

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

**SYSTÉM PRO OVLÁDÁNÍ POČÍTAČOVÉ PREZENTACE S  
VYUŽITÍM GEST**

A SYSTEM FOR CONTROLLING A COMPUTER PRESENTATION USING GESTURES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Radek Němec**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Biomedicínské inženýrství a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

**Student:** Bc. Radek Němec

**ID:** 194854

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Systém pro ovládání počítačové prezentace s využitím gest

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Provedte rešerši zabývající se způsoby bezkontaktního ovládání osobního počítače pomocí gest. Dále se zaměřte na metody využívající moderní senzory pohybu a náklonu pro tento způsob ovládání. 2) Zabývejte se elektronickým vybavením a způsobem komunikace s PC, které jsou součástí využití gest při ovládání funkcí na PC. 3) Navrhněte sestavu řídicí elektroniky a polohových senzorů pro detekci gest za účelem spouštění počítačové prezentace, přepínání mezi snímky prezentace nebo listování mezi stránkami dokumentu, včetně komunikace s PC. Navrhněte sestavu gest a propojených úkonů. 4) Realizujte navržené zařízení a prakticky ověřte jeho funkčnost. Ošetřete vhodným způsobem provádění nežádoucích úkonů. 5) Realizujte zařízení tak, aby bylo nositelné. 6) Provedte diskusi nad dosaženými výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] AKL, A., FENG, C., VALAEE, S. A Novel Accelerometer-Based Gesture Recognition System. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59, no. 12, pp. 6197-6205, Dec. 2011, doi: 10.1109/TSP.2011.2165707.

[2] MARQUS, G., BASTERRETXEA, K. Efficient algorithms for accelerometer-based wearable hand gesture recognition systems. Embedded and Ubiquitous Computing (EUC) 2015 IEEE 13th International Conference on, pp. 132-139, Oct 2015.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 21.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.

**prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem zařízení pro bezkontaktní ovládání počítačové prezentace. V první části jsou teoreticky popsány způsoby bezkontaktního ovládání počítače. Druhá část je soustředěna na rozdělení sensoriky a teoretický popis stěžejních prvků pro práci – vývojové desky TinyPICO ESP32 a senzoru BN0055. Ve třetí části je popsán návrh zařízení a jednotlivých gest.

## **Klíčová slova**

Bezkontaktní ovládání, gesto, prezentace, senzor, TinyPICO, ESP32, BN0055

## **Abstract**

This thesis attempts with the design of a device for contactless control of the computer presentation. In the first part there are theoretically described the methods of contactless computer control. The second part is focused on the description of different types of sensors and also the key elements for this thesis – the development board TinyPICO ESP32 and sensor BN0055. Finally, in the third part there is described the design of the device and gestures.

## **Keywords**

Contactless control, gesture, presentation, sensor, TinyPICO, ESP32, BN0055

## **Bibliografická citace:**

NĚMEC, Radek. *Systém pro ovládání počítačové prezentace s využitím gest*. Brno, 2021, 91 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Radek Němec
<b>VUT ID studenta:</b>	194854
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2020/21
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Systém pro ovládání počítačové prezentace s využitím gest

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 21. května 2021

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vratislavu Čmielovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Králíkovi za pomoc s vyfrézováním PCB desky, Ing. Vratislavu Harabišovi, Ph.D. za pomoc s tiskem obalu pro zařízení na 3D tiskárně, Bc. Matěji Giráškově za pomoc s modelováním obalu a svým prarodičům za pomoc s výrobou pásky pro uchycení zařízení. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům a prarodičům za veškerou psychickou a finanční podporu v průběhu studia.

V Brně dne 21. května 2021

.....  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	11
1 ÚVOD .....	12
2 ZPŮSOBY BEZKONTAKTNÍHO OVLÁDÁNÍ POČÍTAČE .....	13
2.1 Ultrazvuková sensorika.....	13
2.2 Kamerové snímání .....	15
2.3 Bezdrátové rukavice .....	20
2.4 Ovládání pomocí IR senzorů.....	27
3 PRVKY BEZKONTAKTNÍHO OVLÁDÁNÍ.....	31
3.1 Obecné dělení senzorů.....	31
3.1.1 Akcelerometrické a gyroskopické senzory .....	31
3.1.2 Senzory založené na roztažnosti.....	34
3.1.3 Senzory založené na ohebnosti .....	35
3.1.4 Senzory založené na vizuálním vjemu .....	36
3.2 Mikrokontrolér TinyPICO ESP32.....	37
3.2.1 Srovnání s ESP32 a ESP8266.....	37
3.2.2 Programování TinyPICO ESP32 .....	39
3.2.3 Piny a sběrnice na TinyPICO ESP32.....	40
3.3 BNO055 .....	44
3.3.1 Srovnání s jinými IMU senzory .....	46
3.3.2 Piny na BNO055.....	47
4 NÁVRH A REALIZACE ZAŘÍZENÍ .....	48
4.1 Zapojení komponent.....	48
4.2 Návrh a detekce gest .....	50
4.3 Realizace zařízení .....	71
4.4 Dokumentace.....	75
5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI A DISKUZE .....	78
5.1 Výsledky testování .....	78
5.2 Návrhy pro zlepšení zařízení .....	82



6	ZÁVĚR.....	84
	LITERATURA.....	86

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Princip snímání ultrazvukových vln. Převzato a upraveno z [3] .....	14
Obr. 2: Dva ultrazvukové senzory propojené s deskou Arduino. Převzato z [4] .....	15
Obr. 3: Systém pro ovládání kurzoru myši webovou kamerou. Převzato a upraveno z [5] .....	16
Obr. 4: Blokové schéma systému RealSense SDK. Převzato a upraveno z [6] .....	17
Obr. 5: Výsledky testování systému RealSense SDK. Převzato a upraveno z [6] .....	18
Obr. 6: Zařízení SMI iView 250 RED. Převzato z [8] .....	18
Obr. 7: Grafické uživatelské rozhraní SMI Experimental Suite 360°. Převzato z [9] .....	19
Obr. 8: Blokové schéma programu SMI Experimental Suite 360°. Převzato a upraveno z [9] .....	20
Obr. 9: Rukavice DigiTouch. Převzato a upraveno z [10] .....	21
Obr. 10: Blokové schéma systému DigiTouch. Převzato a upraveno z [10] .....	22
Obr. 11: Zjednodušené schéma obvodu palec – prst. Převzato a upraveno z [10] ..	22
Obr. 12: Schéma obvodu palec – prst. Převzato a upraveno z [10] .....	23
Obr. 13: Rozložení QWERTY klávesnice na prstech ruky. Převzato z [10] .....	24
Obr. 14: Blokové schéma rukavice převádějící znakovou řeč na text. Převzato a upraveno z [15] .....	26
Obr. 15: Umístění hardwaru na rukavici. Převzato a upraveno z [15] .....	26
Obr. 16: Data ze senzorů ohybu a akcelerometru pro jednotlivá písmena abecedy. Převzato z [15] .....	27
Obr. 17: Zařízení LeapMotion. Převzato z [22] .....	28
Obr. 18: Systém GestureHook v3.0. Převzato a upraveno z [21] .....	30
Obr. 19: Kapacitní akcelerometr. Převzato z [27] .....	32
Obr. 20: Piezoelektrický akcelerometr. Převzato a upraveno z [28] .....	33
Obr. 21: Princip gyroskopu s využitím Coriolisovy síly. Převzato a upraveno z [29] .....	34
Obr. 22: Senzor založený na roztažnosti. Převzato z [30] .....	35
Obr. 23: ESP32 – čip, modul a vývojová deska. Převzato z [38] .....	37
Obr. 24: Funkční blokové schéma ESP32. Převzato z [37] .....	39
Obr. 25: Ukázka programovacího prostředí Arduino IDE 1.8.13 .....	40
Obr. 26: Rozložení pinů na vývojové desce TinyPICO ESP32. Převzato z [45] .....	41
Obr. 27: Přenos adresy zařízení a dat pomocí I2C sběrnice. Převzato z [47] .....	43
Obr. 28: Detekce arbitrace sběrnic I2C. Převzato z [46] .....	44
Obr. 29: IMU senzor Adafruit BNO055. Převzato z [49] .....	44
Obr. 30: Orientace BNO055 v prostoru .....	45
Obr. 31: Schéma propojení ESP32, BNO055, spínače a baterie .....	49
Obr. 32: Blokové schéma zařízení .....	50

Obr. 33: Vývojový diagram programu.....	54
Obr. 34: Znázornění gesta pro pohyb myši .....	55
Obr. 35: Grafická vizualizace gesta pro pohyb myši .....	56
Obr. 36: Znázornění gesta pro klik myši .....	57
Obr. 37: Grafická vizualizace akcelerometrických dat gesta pro klik myši .....	58
Obr. 38: Blokové schéma detekce gesta pro klik myši.....	59
Obr. 39: Znázornění gesta pro spuštění prezentace .....	60
Obr. 40: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro spuštění prezentace .....	61
Obr. 41: Blokové schéma detekce gesta pro spuštění prezentace .....	62
Obr. 42: Znázornění gesta pro posun prezentace vpřed.....	62
Obr. 43: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro posun prezentace vpřed ..	63
Obr. 44: Blokové schéma detekce gesta pro posun prezentace vpřed .....	63
Obr. 45: Znázornění gesta pro posun prezentace vzad .....	64
Obr. 46: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro posun prezentace vzad.....	65
Obr. 47: Blokové schéma detekce gesta pro posun prezentace vzad.....	65
Obr. 48: Znázornění gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka .....	66
Obr. 49: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka .....	67
Obr. 50: Grafická vizualizace akcelerometrických dat gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka .....	67
Obr. 51: Blokové schéma detekce gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka.....	68
Obr. 52: Znázornění gesta pro ukončení prezentace .....	69
Obr. 53: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro ukončení prezentace .....	69
Obr. 54: Grafická vizualizace akcelerometrických dat gesta pro ukončení prezentace .....	70
Obr. 55: Blokové schéma detekce gesta pro ukončení prezentace.....	71
Obr. 56: Ukázka prostředí programu Autodesk Eagle .....	72
Obr. 57: Deska tištěných spojů s napájecími dutinkami.....	72
Obr. 58: Ukázka prostředí programu Autodesk Fusion360 .....	73
Obr. 59: Ukázka kompletace a finální verze zařízení .....	74
Obr. 60: Správné uchycení zařízení na ruku.....	75
Obr. 61: Připojení zařízení v systému Windows 10.....	76

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Gesta a jim odpovídající instrukce ve VLC přehrávači. Převzato a upraveno z [4] .....	14
Tab. 2: Úspěšnost systému v rozdílných světelných podmínkách. Převzato a upraveno z [5] .....	16
Tab. 3: Úspěšnost jednotlivých neuronových sítí při rozpoznávání gest. Převzato a upraveno z [21] .....	30
Tab. 4: Srovnání parametrů desek ESP8266, ESP32 a TinyPICO. Převzato a upraveno z [37], [39], [40], [41] .....	38
Tab. 5: Srovnání BNO055 s dalšími IMU senzory [51], [53], [54], [55], [56], [57] ..	46
Tab. 6: Přehled navržených gest a instrukcí.....	51
Tab. 7: Polohová data ze senzoru BNO055 .....	51
Tab. 8: Senzitivita detekce gest u jednotlivých uživatelů .....	79
Tab. 9: Specificita detekce gest u jednotlivých uživatelů.....	80
Tab. 10: Celková senzitivita a specificita detekce gest .....	81

# 1 ÚVOD

V dnešním světě plném moderních technologií je možné se setkat s velkým počtem chytrých zařízení pro bezkontaktní ovládání počítače, robotů nebo jakéhokoliv jiného softwaru. Využíváno je v posledních letech hlavně kamerové nebo senzorické snímání gest jednotlivých končetin, obličeje nebo rovnou celého těla, které je poté převedeno na signály nebo je obrazově zpracováno a dále posláno do počítače jako instrukce, na základě které je vykonáno např. pozastavení videa nebo zvýšení hlasitosti hudby. Mnoho pokrokových firem ve světě také vyvíjí různé druhy rukavic nebo jiných zařízení, v nichž se ukrývá gyroskop, akcelerometr a další typy senzorů, díky kterým již není nutné využívat kamery, avšak data jsou snímána přímo z dané končetiny, bezdrátově posílána do počítače a následně zpracována.

V dřívejších letech musel uživatel s výše zmíněnými zařízeními vykonávat různé druhy nepřírodných pohybů, a v případě, že se jednalo o dlouhodobější obsluhu přístroje, mohl být tento typ ovládání pro uživatele nepříjemný nebo mu i přinést zdravotní komplikace. I přesto, že je v dnešní době spousta gest pro mnohé uživatele intuitivních a jednoduchých, tak ať už se jedná o jakékoliv novodobé zařízení 21. století, i ta nejlepší zařízení obsahují mnoho chyb a limitací z vnějšího prostředí, na které je potřeba při vývoji myslet a nezanedbat je.

Jistě se mnoho uživatelů shodne na faktu, že nejpoužívanějším příslušenstvím počítače je myš a klávesnice. Bez těchto dvou zařízení by byla obsluha počítače nemožná. Uživateli se však např. při prezentování může dostat potřeba ovládat počítač i z jeho bezprostřední blízkosti. Východiskem z této situace se nabízí např. prezentér, nebo právě zařízení, které bude na základě vyhodnocené gestikulace uživatele v podobě signálů posílat instrukce do počítače a bude tak schopné ovládat prezentaci bez nutnosti jakéhokoliv jiného příslušenství.

Cílem této práce je navrhnout zařízení, díky kterému bude uživateli umožněno bezdrátově ovládat kurzor myši na obrazovce, otevřít prezentaci a pomocí vhodně navržených gest v ní přepínat jednotlivé slidy, popř. si podat laserové ukazovátko a na závěr prezentaci zavřít.

## 2 ZPŮSOBY BEZKONTAKTNÍHO OVLÁDÁNÍ POČÍTAČE

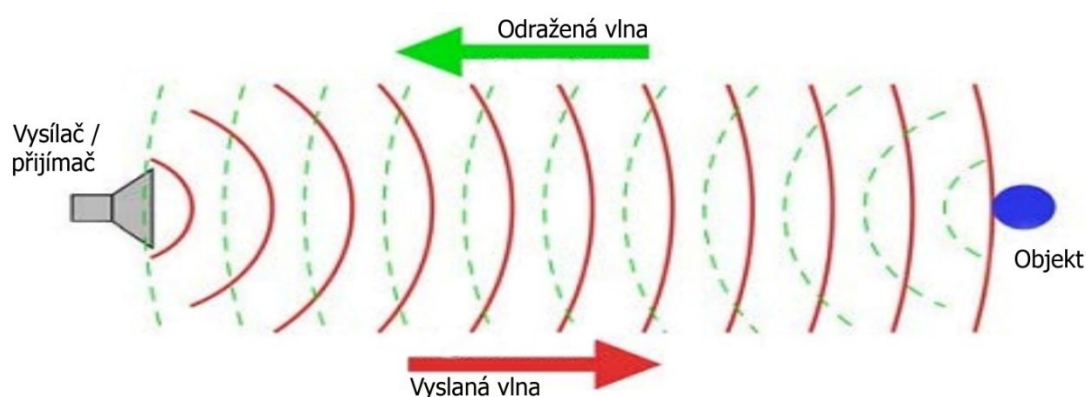
Bezkontaktní ovládání má pro uživatele a okolí mnoho přínosů. Mezi uživatelem a zařízením (myš, klávesnice) není přímý kontakt, tudíž nemusí uživatel řešit hygienické problémy spojené s užíváním stejného zařízení mnoha dalšími uživateli. Gyroskop, akcelerometr nebo magnetické senzory nejsou závislé na zvuku, tím pádem není nutné při implementaci filtrovat zvukový šum z okolí [1]. V neposlední řadě mohou systémy využívající gest mnoho uživatelům odstranit jazykovou bariéru nebo umožnit komunikaci mezi nevidomým a neslyšícím člověkem. Tyto klady jsou však kompenzovány řadou nevýhod. Pro každé zařízení by měl být dostupný návod s přesně definovanou převodní tabulkou gest na dané instrukce, aby byl uživatel vůbec schopný toto zařízení používat. Zařízení musí být naprogramováno s jistou tolerancí – každý uživatel může daný typ pohybu provést odlišně. Uživatel by měl být také obeznámen se vzdáleností, ve které je zařízení nebo daný typ senzoru schopen jeho pohyby detekovat.

Jak již bylo zmíněno výše, problematika bezkontaktního ovládání počítače je v dnešní době velmi rozsáhlá, a rozhodně ji nelze bagatelizovat. Pro lepší pochopení různorodých problémů bude v této kapitole zmíněno několik způsobů bezkontaktního ovládání a také ukázány zařízení, které bezdrátovou komunikaci uživateli s počítačem umožňují. Zahrnuty budou nejen poznatky z oblasti ovládání robotů a využití rukavic pro převod gest na znakovou řeč, ale také z medicínské oblasti, a to konkrétně využití IR senzoru a gest k ovládání snímků na monitorech v operačním sále s využitím metod hlubokého učení.

### 2.1 Ultrazvuková sensorika

Ultrazvukové vlny jsou zvuky na frekvenci vyšší než 20 kHz, které jsou pro člověka neslyšitelné. Ultrazvukové senzory pak fungují na principu vyzařování ultrazvukových vln a následné detekci jejich odrazů. Tento princip lze vidět na Obr. 1, samotný senzor pak na Obr. 2. Senzory pracují na frekvenci 50 kHz a jejich detekční pásmo se pohybuje ve vzdálenosti 0 až 2,5 metru [2]. Mezi jejich základní charakteristiky patří kompaktnost a nízká hmotnost, vysoká citlivost a akustický tlak, malá spotřeba energie a v neposlední řadě vysoká spolehlivost. Díky výše zmíněným charakteristikám se tyto senzory řadí mezi nejlevnější řešení pro měření vzdálenosti v dnešním světě. Senzory lze také klasifikovat do několika tříd [3]. Typy pro běžné použití, které nacházejí své využití v alarmech proti vloupání nebo dálkových ovladačích, vodotěsné typy, využívající se v parkovacích senzorech u

automobilů nebo v měřicích výšky hladiny vody a typy pro vysokou frekvenci, které disponují režimem rozšířené vrstvy piezoelektrické keramiky a jsou tak vhodné pro použití např. v hledáčkích fotoaparátů a kamer.



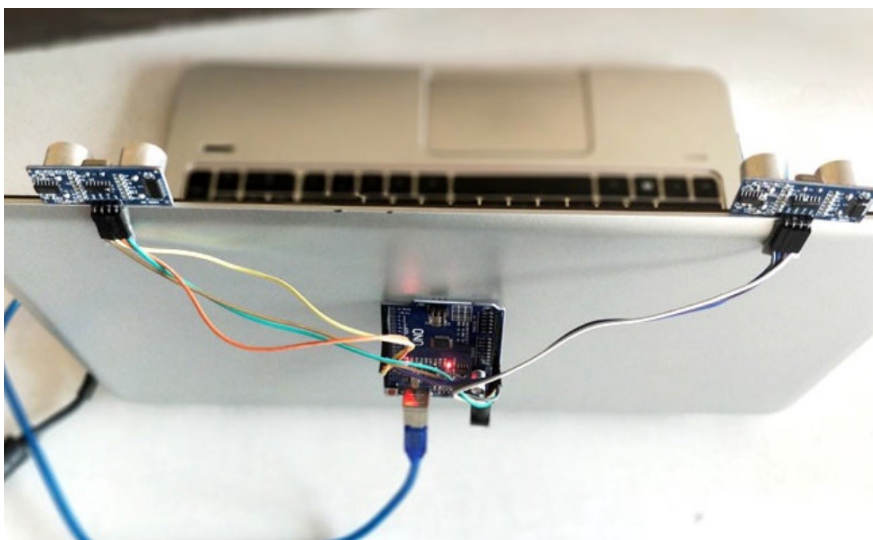
Obr. 1: Princip snímání ultrazvukových vln. Převzato a upraveno z [3]

Hojně diskutovanou technologií je v dnešní době technologie „Leap motion“, která nám umožňuje ovládat některé počítačové funkce pouhým mávnutím ruky před monitorem. Cena laptopů, které touto technologií disponují je však stále poměrně vysoká, proto je řešením alternativa v podobě dvou ultrazvukových senzorů v kombinaci s vývojovou deskou Arduino [4]. Pomocí gest je pak možné spustit a pozastavit video, nebo také měnit hlasitost zvuku.

V [4] jsou uvažovány dva ultrazvukové senzory umístěné na horní straně monitoru, snímající vzdálenost mezi monitorem a rukou. Senzory jsou propojeny s Arduino deskou umístěnou za monitorem. Deska je dále propojena s laptopem pomocí klasického USB portu, který zajišťuje jak napájení, tak komunikaci. Data z Arduino desky jsou zpracována pomocí programu Python, který následně zajišťuje pomocí knihovny pyautogui komunikaci s VLC přehrávačem. Pro konkrétní využití jsou v Tab. 1 uvedena tři gesta a jim odpovídající instrukce pro přehrávač.

Tab. 1: Gesta a jim odpovídající instrukce ve VLC přehrávači. Převzato a upraveno z [4]

Gesto	Instrukce
Obě ruce jsou umístěny do velké vzdálenosti od senzorů	Spuštění a zastavení videa
Pravá ruka je umístěna do velké vzdálenosti od pravého senzoru	Přetáčení videa dopředu
Levá ruka je umístěna do malé vzdálenosti od levého senzoru a následně se přiblíží/oddálí k/od senzoru	Zvyšování a snižování hlasitosti videa



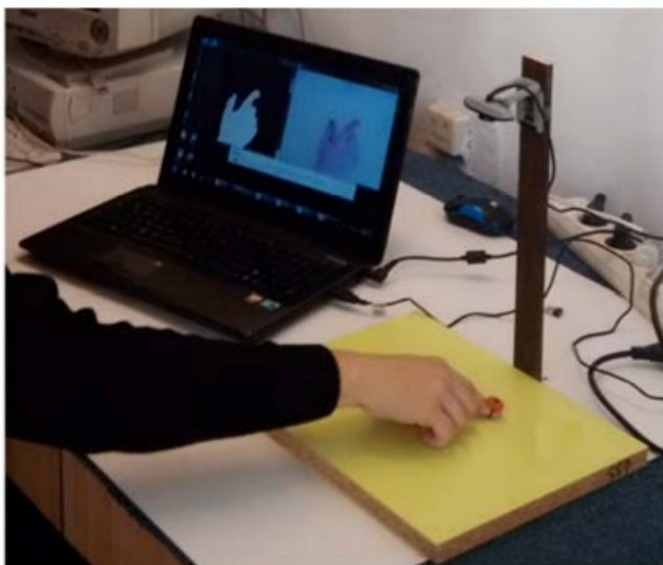
Obr. 2: Dva ultrazvukové senzory propojené s deskou Arduino. Převzato z [4]

## 2.2 Kamerové snímání

Kamera je pro mnohé uživatele pouze nástrojem ke komunikaci a pořizování fotografií nebo videí. Řada z nich však zapomíná na fakt, že může být využita i pro pokročilejší systémy a aplikace v oblasti bezkontaktního ovládání počítače.

Zajímavou myšlenkou je využití externí webové kamery (Genius FaceCam 320) v kombinaci s ruční podložkou (hand padem) pro ovládání kurzoru myši na obrazovce [5]. Jak lze vidět na blokovém schématu programu na pravé straně Obr. 3, aplikace nejdříve pořídí fotografii oblasti podložky, na které je umístěna ruka uživatele ukazující gesto. Pozice prstu ruky na podložce je pak převedena na pozici kurzoru na obrazovce. Na základě gesta je možné v počítači provést instrukce v podobě kliku na levé nebo pravé tlačítko myši, popř. dvojkliku. Hlavní nevýhodou tohoto systému je, že uživatel musí mít obarvené nehty na požadovanou barvu, popř. na nehtech musí mít nalepené barevné pásy, protože algoritmus detekce gesta je založený na rozpoznání barvy nehtu. V předzpracování obrazu je autory algoritmu po pořízení fotografie podložky s rukou ukazující gesto provedeno několik operací. Nejdříve je provedena filtrace šumu z pozadí pomocí Gaussova filtru a poté jsou z fotografie detekovány HSV komponenty (odstín, saturace, hodnota jasu). Díky hodnotám těchto komponent jsou z obrazu segmentovány barevné pásy umístěné na nehtech. Následně jsou na obraz aplikovány morfologické operace v podobě eroze a dilatace (kvůli odstranění nechtěných bílých pixelů po segmentaci obrazu, které by mohly způsobit interferenci v instrukcích) a je detekován počet barevných pásků ve fotografii, načež algoritmus vyhodnotí požadované gesto uživatele a pošle jej jako instrukci operačnímu systému počítače. Celý systém je možné vidět na levé straně Obr. 3.





Obr. 3: Systém pro ovládání kurzoru myši webovou kamerou. Převzato a upraveno z [5]

Další nevýhodou tohoto systému je osvětlení podložky. Díky testování v různých světelných podmínkách, které byly uměle vyvolány dvěma 36W zářivkami, bylo dosaženo rozdílných výsledků, které lze vidět v Tab. 2, z nichž vyplývá jistá závislost systému na světle a dokazují tak nepoužitelnost za nízkých světelných podmínek. Autoři [5] dále zmiňují 100% úspěšnost systému za denního světla (světelnost více než 500 lx).

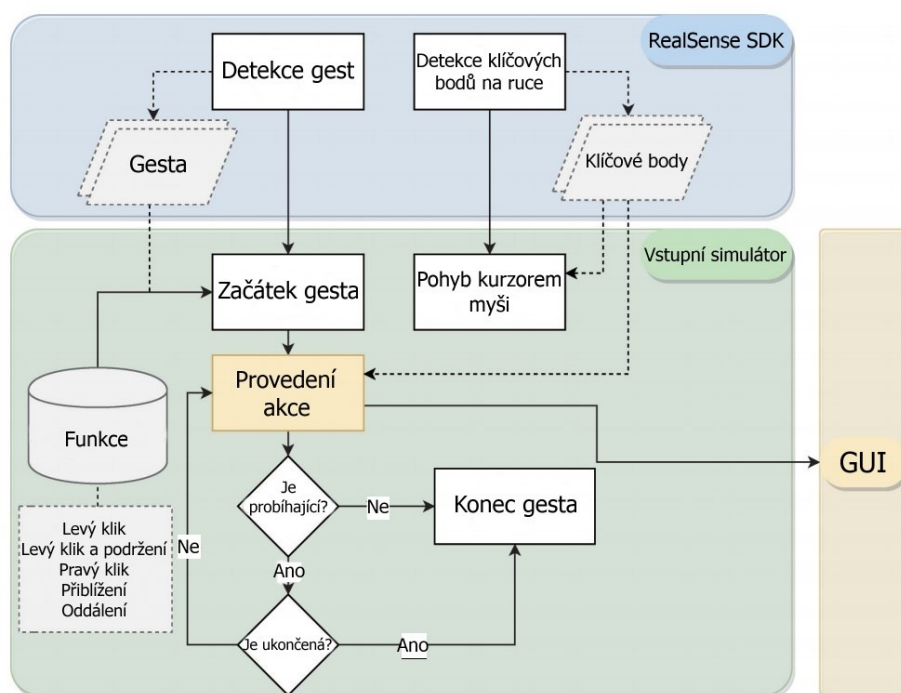
Tab. 2: Úspěšnost systému v rozdílných světelných podmínkách. Převzato a upraveno z [5]

Vykonaná gesta (pravý klik)	Rozpoznaná gesta (pravý klik)	Úspěšnost rozpoznání (pravý klik)	Vykonaná gesta (levý klik)	Rozpoznaná gesta (levý klik)	Úspěšnost rozpoznání (levý klik)	Úroveň osvětlení [lux]
15	0	0 %	15	0	0 %	0
15	12	80 %	15	7	46,7 %	7
15	15	100 %	15	14	93,3 %	22
15	15	100 %	15	15	100 %	54...400

Autoři [6] již vyvinuli sofistikovanější systém využívající kameru Intel RealSense SDK [7], který najde své uplatnění při čtení PDF dokumentu, ovládání prezentace nebo pouhé orientaci v jakékoliv jiné aplikaci. Tento systém je na rozdíl od systému pro ovládání kurzoru myši webovou kamerou [5] založený na pohybech ruky před kamerou, které jsou bez jakéhokoliv dalšího příslušenství automaticky převedeny na dané instrukce operačnímu systému.

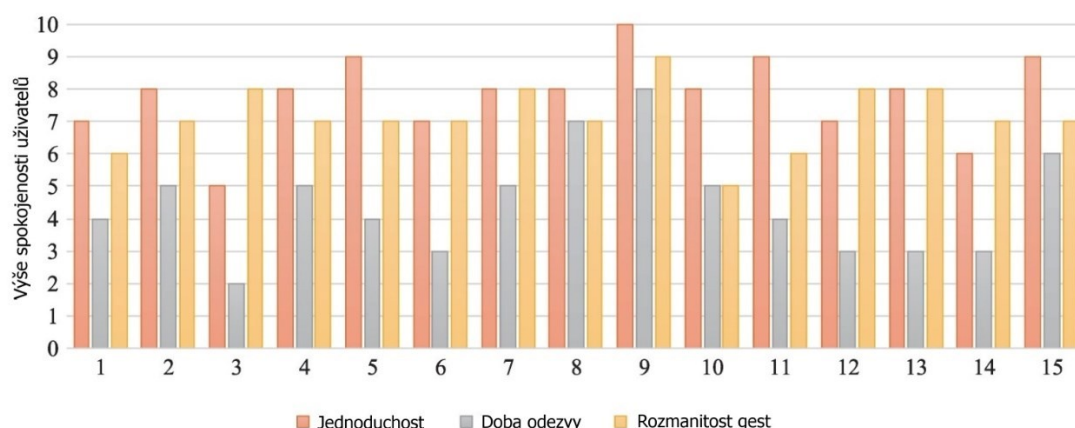
Systém v [6] sestává ze tří vrstev, které je možné barevně odlišné vidět na Obr. 4. První z vrstev – RealSense SDK – má na starost detekci klíčových bodů (22 kloubů) ruky a následné rozpoznání gesta. Na základě pouhé detekce těchto

bodů je možné v reálném čase pohybovat kurzorem myši na obrazovce. Další operace se odehrávají v druhé vrstvě – vstupním simulátoru – který je možné chápat jako algoritmus zpracovávající uživatelem vykonané gesto. V praxi uživatel nejdříve přiloží ruce před kameru. Poté začne provádět požadovaný pohyb, který algoritmus vyhodnotí jako „Začátek gesta“ (Obr. 4). Algoritmus se dále stará o to, zda je ruka uživatele stále v pohybu a má tak nadále provádět požadovanou operaci (např. přibližování fotografie), nebo má danou instrukci ukončit (v případě, že se již ruka uživatele nehýbe). Program disponuje operacemi jako jsou klik pravým a levým tlačítkem myši, přiblížení a oddálení stránky nebo posun stránky. Autoři [6] neuvádějí převodní tabulku gest na instrukce, protože si gesta může uživatel nadefinovat a pojmenovat sám.



Obr. 4: Blokové schéma systému RealSense SDK. Převzato a upraveno z [6]

Program je opatřen oknem, které je možné zobrazit v rohu obrazovky a jsou na něm v reálném čase promítána gesta uživatele. Uživatel tedy může v reálném čase kontrolovat, zda systém jeho úkony vyhodnocuje správně, nebo ne. Toto okno funguje i jako notifikační centrum a podává uživateli informace o vykonaných gestech, nutné kalibraci nebo upozornění, že se uživatel nachází mimo zorné pole kamery. Program byl testován běžnými uživateli, kteří jej vyhodnotili jako intuitivní a užitečný. Mnozí si však stěžovali na jisté zpoždění programu při detekci gest, což potvrzuje i graf na Obr. 5, na kterém lze vidět výsledky testování u 15 uživatelů. Do budoucna chtějí autoři [6] tento systém opatřit RGB kamerou namísto nyní používané RGB-D kamery, rozšířit funkcionalitu programu a implementovat výše zmíněné techniky do mobilních zařízení.



Obr. 5: Výsledky testování systému RealSense SDK. Převzato a upraveno z [6]

Dalším systémem využívající kameru k ovládání počítače je systém iView 250 RED od společnosti SMI, díky kterému je možné ovládat počítač pomocí pohybu očí. [8] Ačkoliv je využití tohoto systému v praxi rozmanité, autor [9] jej využil k orientaci v mapách na internetu.

Zařízení (Obr. 6) disponuje 60Hz obnovovací frekvencí s latencí menší než 25 ms [9]. Poloha a směr oka uživatele jsou detekovány na základě odrazu infračerveného světla od rohovky. Pohyby očí jsou kalkulovány na základě změny intenzity odraženého světla, které detekuje optický senzor zabudovaný v zařízení. Před každým použitím je kvůli odlišné rozlišovací schopnosti očí člověka nutná kalibrace, která však zabere pouhých 10 až 20 s.

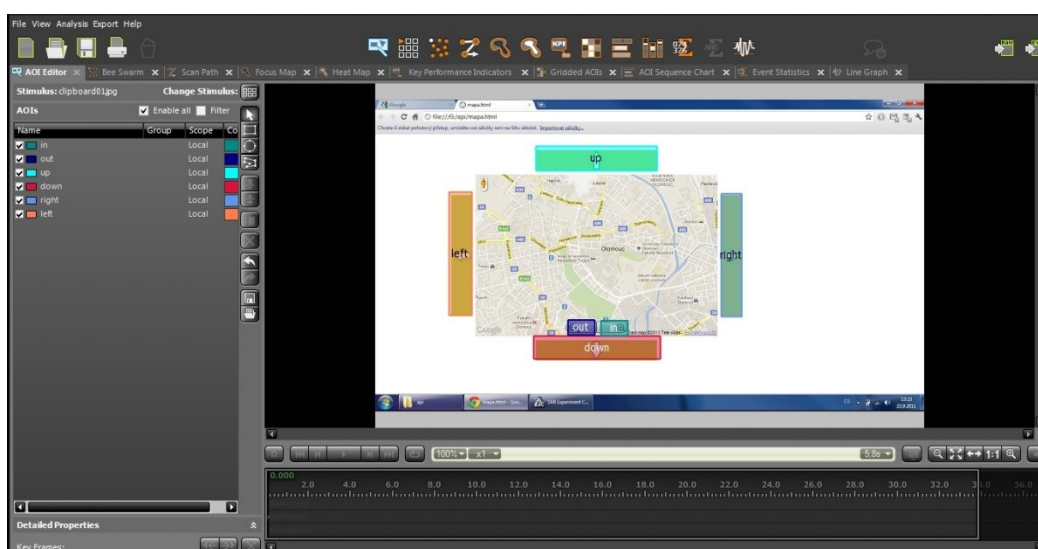


Obr. 6: Zařízení SMI iView 250 RED. Převzato z [8]

Zařízení má však mnoho limitací. Uživatel před ním musí sedět ve vzdálenosti 60 až 80 cm, okolní osvětlení by mělo být rovnoměrné a stěna za uživatelem musí mít neutrální barvu. Co se týče použití kontaktních čoček a brýlí, limitující je zde hranice 3 dioptrií, pod kterou je ještě zařízení schopno správně pracovat. Velkým omezením

je zde barva zornice a duhovky, která si nesmí být podobná. Na toto omezení pak mohou doplatit např. Asiaté.

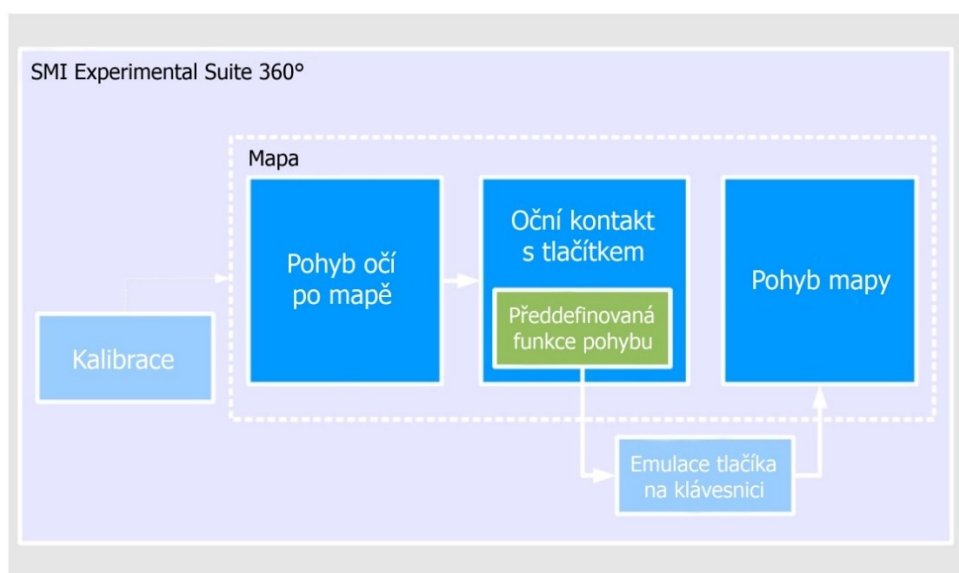
Pro názornou ukázkou byla v [9] použita aplikace SMI Experimental Suite 360° založená na Google Maps API v3. Jedná se o klasickou mapu, kterou je možné standartně ovládat myší a klávesnicí, přičemž právě ovládání klávesnicí v tomto případě hraje velkou roli. Z každé strany mapy se totiž nachází tlačítko, při jehož stisku (myšleno pohledu na tlačítko) se mapa pohne požadovaným směrem. Tato čtyři tlačítka jsou emulována šipkami na klávesnici. Přibližování a oddalování mapy je zajištěno dvěma tlačítky na spodní straně mapy. Tato tlačítka jsou pak emulována klávesami „+“ a „-“. Celé grafické uživatelské rozhraní výše zmíněného softwaru je možné vidět na Obr. 7.



Obr. 7: Grafické uživatelské rozhraní SMI Experimental Suite 360°. Převzato z [9]

V tomto programu lze předdefinovat tzv. „trigger“, neboli spouštěč, který se stará o aktivaci dané funkce (přiblížení, oddálení, posun doleva atd.). Na základě těchto funkcí je pak emulováno odpovídající tlačítko na klávesnici (posun doleva = levá šipka). Dále je zde možné nastavit tzv. dwell-time, neboli čas, po který je nutné konstantně sledovat požadované tlačítko aby došlo k předání instrukce (aktivaci triggeru). Tento čas nastavujeme v milisekundách a působí zde jako prevence před nechtěnými krátkými pohledy na dané tlačítko. Podle výsledků testování aplikace, které proběhlo na 12 lidech (4 ženy a 8 mužů ve věku 19 až 26 let), je doporučeno nastavit dwell-time na 400 až 500 ms. Hodnoty pod 400 ms nezaručují uživateli schopnost cílevědomého zaměření na objekt, hodnoty nad 500 ms mohou naopak zpomalovat běh celé aplikace a práce s ní. Na Obr. 8 lze vidět blokové schéma celého programu. Nejdříve je po schválení uživatelem provedena kalibrace, o což se automaticky postará SMI software. Na obrazovce se na předem daných místech postupně zobrazují body a uživatel je povinen se na ně dívat. Pro dostatečnou

kalibraci stačí 5 bodů. Pro náročnější uživatele očekávající velmi přesné ovládání je možno nastavit i 9 nebo 13 bodovou kalibraci. Uživatel se pak může volně rozhlížet po mapě. Oční kontakt s tlačítkem, delší, než předdefinovaný dwell-time, má za následek aktivaci předdefinované funkce (triggeru), která se postará o následnou emulaci klávesy, načež je vykonán pohyb mapy. Procedura je však vykonána pouze jednou, a pokud chce uživatel pohyb zopakovat, musí oční kontakt s tlačítkem přerušit a poté opětovně navázat.



Obr. 8: Blokové schéma programu SMI Experimental Suite 360°. Převzato a upraveno z [9]

Veškeré uživatelské vstupy, jako je například trajektorie očních pohybů, jsou monitorovány a zaznamenávány do externích souborů ve formátu „.idf“ (iView Data Format) [9]. Jedná se o formát dat, který musí být otevřený SMI softwarem a poté je tato data možné exportovat do jiných formátů. Dat je možné využít při externí analýze experimentů prováděných se zařízením a jsou rozdělena na čtyři části. První část – hlavička – obsahuje metadata o prováděném experimentu (název, datum, jméno uživatele). Ve druhé části jsou zaznamenány souřadnice kalibračních bodů. Třetí část obsahuje údaje o nastavení zařízení a ve čtvrté části jsou samotná data souřadnic, po kterých se uživatel při experimentu pohyboval.

## 2.3 Bezdrátové rukavice

Za jednu z nejrozšířenějších technik bezdrátového ovládání v dnešní době jsou považovány různé typy rukavic, ve kterých jsou implementovány nejrůznější typy senzorů. Tyto rukavice mohou být využity k ovládání počítačových her nebo robotů, ale mohou také uživateli nahradit klávesnici a pomoci neslyšícím při komunikaci



znakovou řečí. V neposlední řadě je možné na tyto rukavice implementovat LED diody a s pomocí kamery je využít k ovládání počítače.

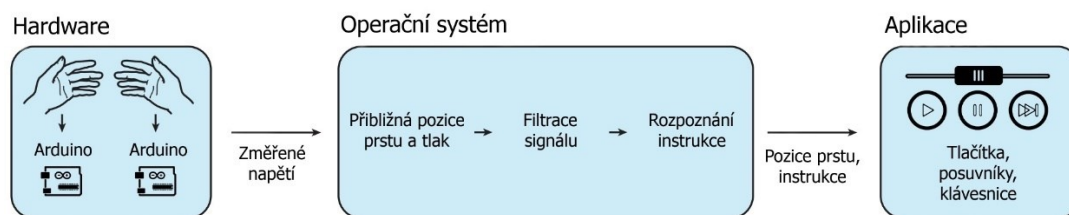
Jednou z vizí budoucnosti je promítání map, videí, textových zpráv nebo aplikací jako jsou Facebook a Instagram na tzv. „head-mounted“ displeje, neboli projekční helmy, přičemž by pro psaní zpráv nebo ovládání videí bylo využito právě bezdrátových rukavic. Takové technologie již přichází na trh v podobě Google Glass nebo Microsoft HoloLens, avšak v některých případech ještě nejsou zcela odladěny, popř. je práce s nimi spíše namáhavá, než aby uživatelům dopřály pohodlí. Jednou z možností, jak přenést uživatelský vstup na displej ve virtuální realitě v podobě brýlí, je systém DigiTouch [10]. Jedná se o rukavice z elastického nylonu (Obr. 9), které na prstech obsahují polovodivé pásy a na palci vodivou nášivku. Polovodivé pásy jsou vyrobeny ze směsi polyesteru a bavlny s tenkými vlákny z nerezové oceli. Jádrem vodivé nášivky na palci je opět nerezová ocel obalená v tkané bavlně. Dotykem palce na jednotlivé části prstů je pak možné příslušnému zařízení zaslat instrukci. V případě systému DigiTouch jsou instrukce příslušející dané poloze prstu konfigurovatelné – je tedy možné si na poslední článek ukazováčku pravé ruky nastavit přetáčení videa vpřed, zatímco první článek ukazováčku levé ruky bude zajišťovat pozastavení videa.



Obr. 9: Rukavice DigiTouch. Převzato a upraveno z [10]

Každá z rukavic je napájena deskou Arduino Trinket Pro. Tato deska měří napětí na jednotlivých částech rukavice, se kterými je propojena a je umístěna na horní straně ruky. V neposlední řadě se stará o bezdrátovou komunikaci s počítačem pomocí RF protokolu GZLL (Gazell Link Layer) [10]. Software v počítači po přijetí dat z Arduino desky zajišťuje jejich následné zpracování v podobě odhadu pozice palce a jeho tlaku na prst, filtraci signálu a nakonec rozpoznání instrukce,

kterou následně v aplikaci vykoná. Pro lepší představu fungování celého systému je možné na Obr. 10 vidět jeho blokové schéma.



Obr. 10: Blokové schéma systému DigiTouch. Převzato a upraveno z [10]

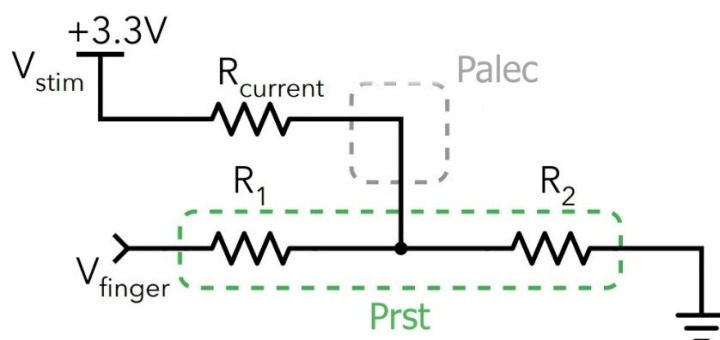
Polovodivé pásky na prstech mají jednotnou hodnotu odporu po celé své délce a každý z nich disponuje odporem  $500\ \Omega$ . Na Obr. 11 je možné vidět zjednodušené schéma obvodu s jedním prstem a palcem, tedy jedním polovodivým páskem a vodivou nášivkou.  $R_1$  reprezentuje odpor polovodivého pásku mezi kloubem a palcem,  $R_2$  reprezentuje taktéž odpor pásku, tentokrát však mezi palcem a konečkem prstu. Na palec je přivedeno napětí  $V_{stim}$  (3,3 V) a  $R_{current}$  je fyzický rezistor, jehož odpor je konstantní a omezuje tok proudu – umožňuje tak s obvodem zacházet jako s děličem napětí. Při měření napětí ve spodní části prstu ( $V_{finger}$ ) a připojení konce prstu na zem je možné odvodit  $R_2$  na základě vzorce (1).

$$V_{finger} = V_{stim} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{current}} \quad (1)$$

Za předpokladu, že celkový odpor  $R_T$ , vyjádřen ve vzorci (2) je konstantní, je možné odhadnout polohu doteku  $x$  podle vzorce (3).

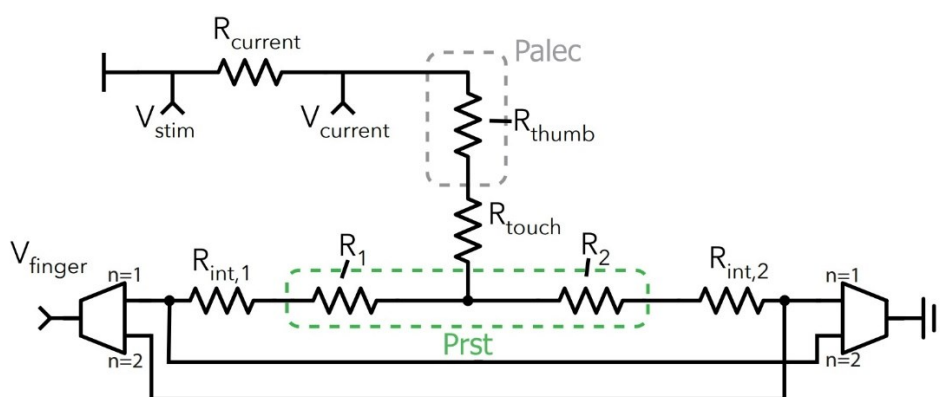
$$R_T = R_1 + R_2 \quad (2)$$

$$x = \frac{R_T - R_2}{R_T} \quad (3)$$



Obr. 11: Zjednodušené schéma obvodu palec – prst. Převzato a upraveno z [10]

Nedokonalosti zjednodušeného obvodu řeší obvod na Obr. 12, který již počítá s dodatečným odporem ( $R_{thumb}$ ,  $R_{int1}$ ,  $R_{int2}$ ) na každém z rozhraní drát – tkanina, a také počítá s odporem  $R_{touch}$ , který představuje odpor styku vodivé nášivky na palci s polovodivým textilním páskem. V obvodu je dále zahrnut digitální osmikanálový multiplexer (na Obr. 12 jsou zobrazeny pouze dva kanály, zbylé kanály jsou připojeny k ostatním prstům), který při měření výstupního napětí  $V_{finger}$  zohledňuje proměnný odpor  $R_T$ .



Pokud se palec nedotýká žádného prstu, mikrokontroler přepíná mezi osmi kanály multiplexeru na základě tří digitálních linek. Mikrokontroler přepíná mezi zemí a A/D převodníkem u všech čtyř prstů. Pokud je jedna strana prstu uzemněná, druhá je připojena na A/D převodník. V momentě zachycení doteku palce a prstu dochází k přepínání mezi zemí a A/D převodníkem pouze u daného prstu za účelem zrychlení přenosu dat a je měřeno napětí  $V_{\text{finger}}$ . Zároveň dochází k měření proudu protékajícího palcem měřením úbytku napětí na rezistoru  $R_{\text{current}}$ . Pro každý prst je tedy měřeno  $V_{\text{stim1}}$ ,  $V_{\text{current1}}$  a  $V_{\text{finger1}}$ , pokud je uzemněna vnitřní část prstu, a nebo  $V_{\text{stim2}}$ ,  $V_{\text{current2}}$  a  $V_{\text{finger2}}$ , pokud je uzemněna vnější část prstu. Odpory  $R_{\text{thumb}}$ ,  $R_{\text{int1}}$  a  $R_{\text{int2}}$  jsou konstantní a mohou být nastaveny jednorázovou kalibrací. Nejdříve je odhadnut proud  $I_n$  (v obou fázích  $R_1$  i  $R_2$ ) protékající palcem (4) a poté je spočítán odpor obou sekcí polovodivého pásku na základě (5). Dosazením do vzorce (3) je následně odhadnuta pozice doteku  $x$ .

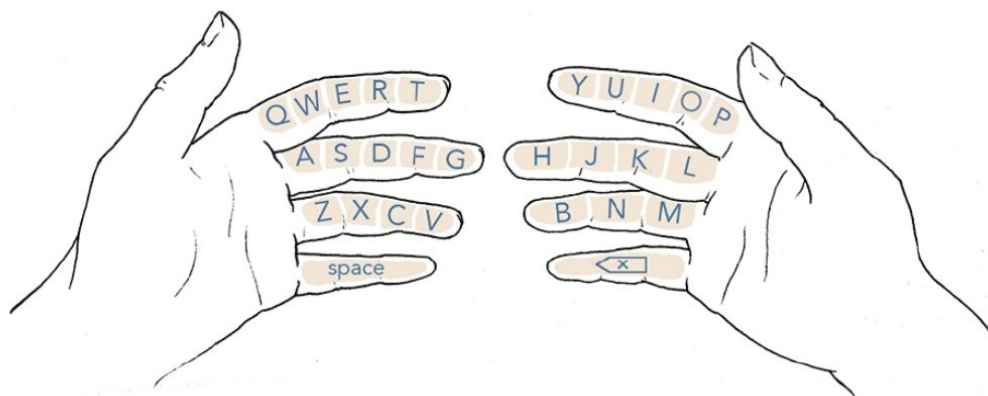


$$I_n = \frac{V_{stim,n} - V_{current,n}}{R_{current}} \quad (4)$$

$$R_n = \frac{V_{finger,n}}{I_n} - R_{int,n} \quad (5)$$

Surová data jsou z přenášena bezdrátově do počítače pomocí rozhraní Bluetooth. Každý přenos obsahuje informaci o tom, na kterém prstu byl dotek proveden a taktéž o naměřeném výstupním napětí. V průběhu doteku jsou data vzorkována s frekvencí 160 Hz. V ostatních případech je použita pouze 70Hz vzorkovací frekvence. Vzhledem k tomu, že při pohybu ruky a prstů může být signál zašuměn, na data je během zpracování aplikován exponenciální vyhlazovací filtr. Na základě zpracovaných dat jsou rozpoznány tři fáze – palec a prst se nedotýkají, palec a prst se dotýkají a palec po prstu přejíždí – na základě kterých počítač vykoná požadovanou instrukci.

K ověření funkčnosti rukavice DigiTouch se autoři [10] rozhodli využít tento systém jako QWERTY klávesnici, která bude převádět vstupní signály na text na obrazovce počítače. Tato představa může z hlediska 28 tlačítek (26 písmen, mezerník a klávesa pro mazání textu) působit jako nemožná, proto byly dříve konkurencí vyvíjeny spíše rukavice, které převáděly na výstupní text hlasové vstupy [11]. Rozdělením klávesnice v půli je zajištěno, že se na jednom prstu nenachází více než 5 kláves (Obr. 13). Na malíčcích jsou z důvodu pohodlí při psaní pouze klávesy „space“ a „backspace“. Ke zvýšení přesnosti se může uživatel dotknout požadované klávesy, ta se následně na obrazovce rozsvítí a v případě zadání dočasně chybného vstupu ze strany uživatele je možné přemístit palec na jinou klávesu, která je použita na výstupu až po odejmutí palce z prstu.



Obr. 13: Rozložení QWERTY klávesnice na prstech ruky. Převzato z [10]

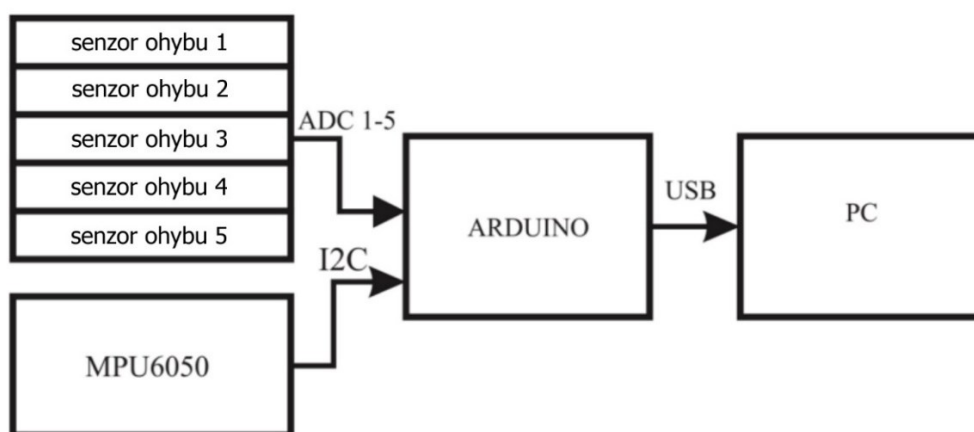
Cílem samotného testování bylo ověřit, zda budou uživatelé schopni takové zařízení používat a jak se jejich přesnost a rychlost používání budou zlepšovat postupem času. Sedm mužů a tři ženy ve věku 18 až 27 let se účastnili této studie. Osm z nich bylo pravorukých, zbylí dva levorucí. Všichni byli vyhodnoceni jako znalí při používání chytrého telefonu. Při testování bylo využito internetového prohlížeče Google Chrome na stolním počítači s operačním systémem Windows 7. Účastníci mohli sedět a mít ruce v přirozené a pohodlné poloze, avšak si na ně nemohli vidět. K dispozici měli pouze referenční klávesnici na monitoru, shodnou s klávesnicí na dlani ruky. Testování probíhalo po dobu 15 dní, 20 minut za den. Účastníci opisovali texty, které byly náhodně vybírány z [12] a zahrnovaly pouze malá písmena bez číslic. Rychlost byla měřena ve slovech napsaných za minutu za předpokladu, že průměrné slovo má pět písmen. Výsledkem prvního testování byla průměrná hodnota 7 slov/min., výsledkem posledního (desátého) pak překvapivých 16 slov/min. Dále byla posuzována přesnost psaní, a to na základě dvou faktorů. Prvním z nich byl počet provedených oprav v napsaném textu a druhým byl počet chyb, které po sobě účastník neopravil. Co se týče procentuálního počtu provedených oprav, výsledkem prvního testování byla stanovena hodnota 25 %, posledního testování pak pouhých 15,8 %, tedy necelých 16 ze 100 písmen účastník napsal špatně a poté je opravil. Chyb, které po sobě účastník neopravil bylo napříč celým testováním pouhých 0,85 %. Závěrem se tak jedná o velmi zajímavé zařízení propojující novodobé technologie, které nalezne uplatnění nejen v psaní textu, ale také v ovládání počítačových aplikací.

Velice zajímavým – a pro biomedicínské využití přínosným projektem – je využití senzorů detekujících ohyb prstů ruky v kombinaci s gyroskopicko-akcelerometrickým senzorem MPU6050 [13] a vývojovou deskou Arduino Nano [14] jako automatický překladač znakové řeči [15]. Takové zařízení může mít v dnešní době velké uplatnění, protože lidí se sluchovým postižením je vskutku mnoho. Dle výzkumu Gallaudetovy univerzity [16] ve Washingtonu DC (USA) z roku 2010 je přibližně 0,2 až 0,4 % lidí v populaci prakticky neslyšících, avšak více než polovina těchto lidí jsou osoby ve věku nad 65 let. Osob s výraznou nedoslýchavostí je pak pak zhruba desetinásobek, tedy 2 až 4 % [17]. Co se týče statistik v České republice, k roku 2017 je zde zhruba 0,5 milionu nějakým způsobem sluchově postižených lidí. Prakticky neslyšících osob je z tohoto počtu asi 7600. Uživatelů znakového jazyka, kteří by jistě zařízení tohoto typu uvítali je v České republice 7300 [18].

Klíčovými slovy v této oblasti jsou flexe a sklon. Jedná se o dvě hlavní proměnné, které je nutné uvažovat při každém gestu prstů ruky a následném převodu tohoto gesta na výstupní písmeno ve znakové řeči. O detekci flexe, neboli ohybu v kloubu se u tohoto zařízení stará 5 senzorů, které jsou umístěny na prstech ruky. K měření náklonu ve třech osách je pak využit senzor MPU6050 a o zpracování

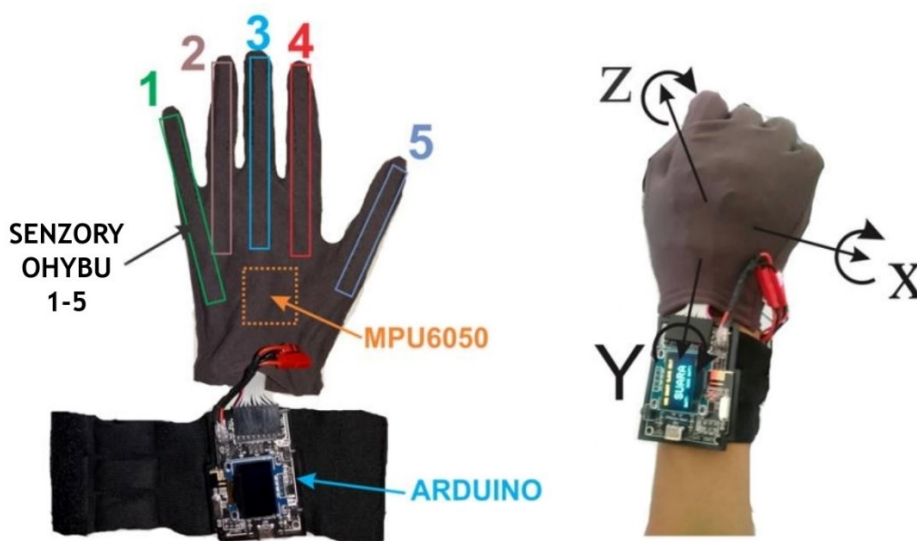
a přenos dat do počítače se stará vývojová deska Arduino [15]. Vše je ukryto v látkové flexibilní rukavici, která je navržena pro snadné a pohodlné použití. Uživatel jednoduše gestikuluje znakovou řečí, která je následně převedena na text na monitoru nebo na zvukový výstup do reproduktorů počítače.

Z blokového schématu zařízení (Obr. 14) je možné vidět, že senzory ohybu předávají z prstů ruky Arduino desce signály pomocí A/D převodníku. Senzor MPU6050 pak komunikuje s Arduino deskou pomocí sběrnice I2C a samotná deska je s počítačem propojená USB kabelem [15]. V každém senzoru ohybu je pak dělič napětí s rezistorem o odporu 10000  $\Omega$ .



Obr. 14: Blokové schéma rukavice převádějící znakovou řeč na text. Převzato a upraveno z [15]

Zatímco senzory ohybu jsou umístěny na konečky prstů a senzor MPU6050 je umístěn přímo na dlani, Arduino deska je připevněna na zápěstí ruky a jako jediný komponent není skrytá pod látkovou rukavici (Obr. 15).



Obr. 15: Umístění hardwaru na rukavici. Převzato a upraveno z [15]

Ve znakové řeči odpovídá každému písmenu jedno gesto. Díky tomu je možné pro každé písmeno zaznamenat jiné hodnoty z náležíčích senzorů ohybu. Při testování zařízení bylo pro každé písmeno vygenerováno 100 gest, přičemž byly mezi gesty udržovány 1s časové rozestupy. Sledovány byly parametry ze senzorů ohybu a dále parametry z akcelerometru senzoru MPU6050 v osách x a y. Na základě nasnímaných hodnot byla vytvořena tabulka zobrazující průměr těchto parametrů ze 100 měření. Část této tabulky je možné vidět na Obr. 16.

Alphabet	Flex sensor 1	Flex sensor 2	Flex sensor 3	Flex sensor 4	Flex sensor 5	Acc X	Acc Y
A	754.58	747.51	744.64	719.41	858.10	-15,557.58	-1,840.04
B	511.52	510.90	508.09	511.18	903.05	-15,816.73	-672.97
C	582.22	628.07	614.12	623.98	884.06	-16,345.37	-214.06
D	636.70	660.67	647.79	539.22	879.64	-16,344.69	700.44
E	735.55	743.28	738.26	737.46	915.11	-16,111.43	1,526.06
F	513.90	516.21	516.24	690.08	902.97	-16,142.18	1,360.61
G	748.31	730.81	715.81	554.66	865.23	-5,215.11	-14,692.16

Obr. 16: Data ze senzorů ohybu a akcelerometru pro jednotlivá písmena abecedy. Převzato z [15]

V tabulce je možné vidět naměřené hodnoty ze senzorů ohybu a akcelerometru. Autoři [15] bohužel neuvádějí jednotky těchto hodnot. Co se týče senzorů ohybu, jedná se o míru flexe daného prstu. Hodnoty z akcelerometru pak udávají náklon ruky při gestikulaci. Autoři publikace však apelují na snadné rozlišení jednotlivých gest na základě hodnot z tabulky na Obr. 16. Bohužel neuvádějí ani výsledky testování na reálných subjektech.

Dalším možným způsobem využití bezdrátových rukavic může být kombinace kamery a rukavice s LED diodami k ovládání základních úkonů na počítači [19]. Hojně využívané jsou bezdrátové rukavice také v robotice. Konkrétním příkladem může být publikace [20], popisující interakci lidského faktoru s robotem právě pomocí rukavice se senzory pohybu, jejichž praktické využití zde již bylo popsáno výše.

## 2.4 Ovládání pomocí IR senzorů

Na nemocničních operačních sálech je nutností, aby měli jak chirurgové, tak sestry kontrolu nad mnohými aplikacemi, jako jsou komunikační systém PACS, elektronické záznamy o kondici pacientů nebo programy umožňující pouhé prohlížení snímků. Všechny tyto operace je samozřejmě možné provádět pomocí klávesnice a myši, avšak tato zařízení mohou být zdrojem bakterií a infekčně přenosných onemocnění, což jistě v těchto podmínkách není žádoucí, a navíc to

může přinést značné časové zdržení, což vzhledem k možné kritické kondici pacientů také není na místě. V tomto ohledu se vzhledem k výše zmíněným náležitostem jeví jako vhodné řešení využití IR senzorů zabudovaných v technologii LeapMotion [21].

Technologie LeapMotion (Obr. 17) v sobě ukrývá dvě kamery a tři infračervené LED diody. LeapMotion snímá infračervené světlo o vlnové délce 850 nm, což odpovídá hodnotě mimo spektrum viditelné lidským okem. Vzdálenost objektu od zařízení, ve kterém je zařízení schopno bez problémů pracovat je stanovena na 80 cm. Tento rozsah je omezen šířením světla prostorem, protože od určité vzdálenosti by již bylo ve 3D prostoru obtížné odvodit polohu ruky. Intenzita světla je pak omezena maximálním proudem, který je zařízení ze sběrnice USB odebírat. Výsledná data mají podobu stereofonního obrazu ve stupních šedi (v levé části je obraz z levé kamery, v pravé části je obraz z pravé kamery). Jediné viditelné objekty na výstupním obraze jsou ty, které osvětlují LED diody zařízení [22]. I za denního světla tedy bude pozadí na obraze tmavé. Naopak tmavé věci v těsné blízkosti od zařízení se na obrázcích budou jevit jako světlé. Tuto skutečnost lze pozorovat níže na Obr. 18.



Obr. 17: Zařízení LeapMotion. Převzato z [22]

Obrazová data jsou poté přes USB odeslána do počítače, kde jsou následně zpracována dodávaným softwarem a převedena na požadované instrukce počítači.

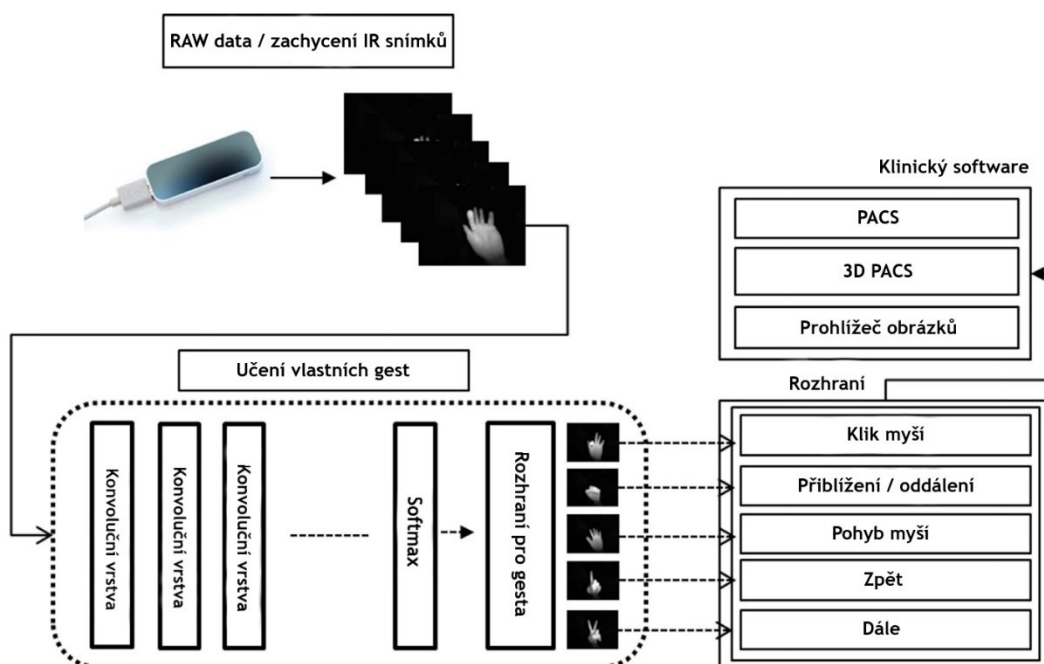
Právě technologii LeapMotion využili autoři [21] ve spojení se zpracováním výstupních obrazů pomocí neuronových sítí k emulaci myši a klávesnice pomocí jednoduchých gest na operačním sále. Celkově bylo navrženo pět gest, umožňující ovládání programů PACS, 3D PACS, Microsoft PowerPoint a prohlížeče obrázků. Co se týče využití umělé inteligence, použity byly hluboké konvoluční neuronové sítě (DCNN), kapslová neuronová síť (CapsNet) a VGGNet-16.

Na deklaraci pěti gest (Obr. 18) se podílelo 10 subjektů, přičemž gesta byla snímána technologií LeapMotion se 60 snímky za sekundu při rozlišení 160 x 120 pixelů. Jednalo se o šedotónové obrazy s 8-bit hloubkou [21]. K rozšíření trénovací datasetu bylo využito geometrických operací s již nasnímanými obrazy, a to rotace nebo převzorkování obrazu. Dále byly využity také techniky jako jsou translace obrazu nebo změna osvětlení dílčích částí. Díky těmto úpravám byl původní trénovací dataset rozšířen na pětinasobek. Finální dataset byl pak rozdělen na dvě části – trénovací a testovací – v poměru 80/20 %.

K učení a testování datasetu byly využity tři typy neuronových sítí – hluboké konvoluční neuronové sítě (DCNN), kapslová neuronová síť (CapsNet) a síť VGGNet-16. Nejjednodušší architekturou disponuje síť DCNN, která sestává ze tří konvolučních vrstev a byla navržena spíše za účelem pouhého srovnání jednodušší sítě se složitějšími architekturami. Síť VGGNet-16 disponuje 16 konvolučními vrstvami, přičemž na sebe jednotlivé vrstvy navazují, zatímco síť DCNN disponuje třemi konvolučními vrstvami, třemi pooling vrstvami a výstupním klasifikátorem. Poslední použitou sítí je kapslová neuronová síť CapsNet, která je ve své podstatě založena na sítích typu DCNN, avšak odstraňuje jisté nevýhody, které v sobě DCNN skrývá. Hlavní nevýhodou v oblasti zpracování obrazů pomocí DCNN sítě je, že od sebe nedokáže odlišit jednodušší objekty. Pod kapslí je možné si v tomto případě představit soubor neuronů, jejichž výstupy jsou reprezentovány jako rozdílné charakteristiky stejného objektu, přičemž každá kapsle obsahuje jakousi pravděpodobnost aktivace. Délka výstupu této sítě pak odpovídá pravděpodobnosti přítomnosti objektu vyjádřeného kapslí v aktuálním vstupu. Všechny tři typy algoritmů byly testovány 10 jedinci. Úspěšnost jednotlivých algoritmů je možné vidět v Tab. 3, přičemž nejvyšší úspěšnosti u čtyřech gest z pěti dosahovala síť CapsNet. Gesto „Zpět“ je charakterizováno vztyčeným ukazováčkem, gesto „Dále“ pak vztyčeným ukazováčkem a prostředníčkem. Celý tento systém pak autoři nazvali GestureHook v3.0 (Obr. 18) [21]. Závěrem se jedná o poměrně sofistikovaný systém, který dosahuje vysoké úspěšnosti a jistě najde uplatnění na mnoho operačních sálech. Toto tvrzení dokládá publikace [23] z roku 2016, využívající stejné zařízení a monitorující stejná gesta jako [21] k ovládání programů 3D PACS a prohlížeče obrázků na operačních sálech, která zmiňuje značný přínos v oblasti kontroly operačního systému z hlediska časové náročnosti.

Tab. 3: Úspěšnost jednotlivých neuronových sítí při rozpoznávání gest. Převzato a upraveno z [21]

Gesto / síť	DCNN	VGGNet-16	CapsNet
Rozevřená dlaň	56 %	56 %	86 %
Sevřená dlaň	84 %	80 %	98 %
Klik	81 %	83 %	84 %
Zpět	74 %	82 %	74 %
Dále	73 %	81 %	90 %



Obr. 18: Systém GestureHook v3.0. Převzato a upraveno z [21]

## 3 PRVKY BEZKONTAKTNÍHO OVLÁDÁNÍ

V této kapitole bude rozebráno obecné dělení senzorů do jednotlivých tříd, jejich popis a uplatnění. Dále se bude zabývat součástkami použitými v této diplomové práci, a to mikrokontrolerem ESP32 a IMU senzorem BNO055. V neposlední řadě budou tyto součástky srovnány s jejich předchůdci nebo s novějšími modely na trhu.

### 3.1 Obecné dělení senzorů

Technologie popsané v kap. 2 využívaly v zařízeních mnoho typů senzorů. Z obecného hlediska se samozřejmě dají dělit senzory podle měřené veličiny (senzory rychlosti, tlaku nebo teploty), podle styku senzoru s prostředím (dotykové a bezdotykové) nebo také podle fyzikálního principu senzoru (kapacitní, odporové nebo indukční). V této kapitole budou senzory rozděleny na základě využití v novodobých zařízeních do šesti kategorií a detailně popsány [24].

#### 3.1.1 Akcelerometrické a gyroskopické senzory

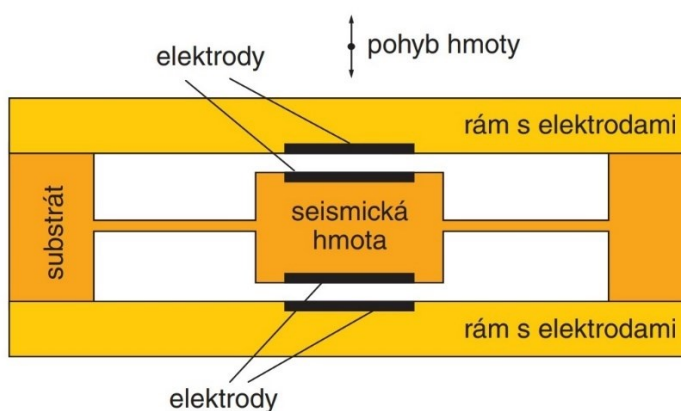
Akcelerometr je zařízení, které umožňuje měřit zrychlení (lineární i úhlové). Hojně využíváný je v mobilních telefonech, chytrých hodinkách, dronech a v neposlední řadě pak k měření vibrací. Většinou je používán společně s gyroskopem a magnetometrem, se kterými formuje IMU jednotku (Inertial Measurement Unit). [24] O IMU jednotkách detailněji pojednává kap. 3.3. Akcelerometry se dělí do několika skupin a při výběru akcelerometru je nutné dbát na jeho parametry. Mezi ty základní patří počet os (1D, 2D nebo 3D), maximální rozsah udávaný v jednotkách g (maximální měřitelné zrychlení), frekvenční rozsah udávaný v jednotkách Hz (maximální frekvence změny zrychlení), citlivost udávaná v jednotkách pC/g nebo mV/g a teplotní rozsah, ve kterém je zařízení schopno pracovat [25]. V dnešní době rozlišujeme dvě základní skupiny akcelerometrů – piezoelektrické a kapacitní.

Hlavní uplatnění nalézají akcelerometry při detekci gest a v herní oblasti. Jednou ze zajímavých implementací je [26], která pojednává o implementaci šesti akcelerometrů do rukavice určené k rozpoznávání gest Vietnamské znakové řeči. Jeden z akcelerometrů je umístěn na spodní straně dlaně, zbylých pět pak na vrchní straně.



## Kapacitní akcelerometry

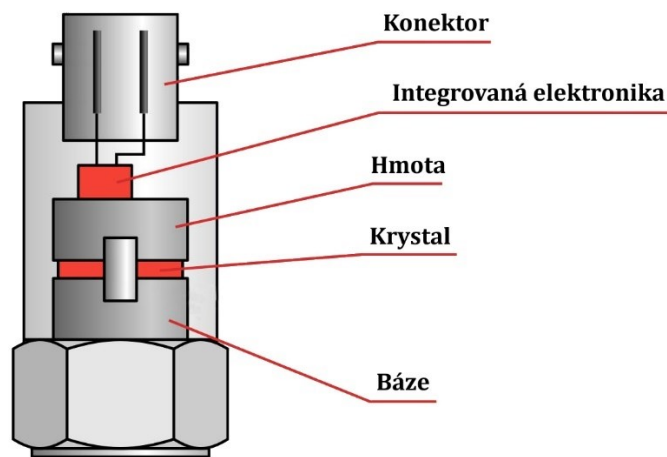
Tento typ akcelerometrů se řadí mezi nejvíce využívaný a nejlevnější typ mezi těmito senzory. Základním prvkem tohoto typu akcelerometru je deskový kondenzátor s pohyblivými kapacitními elektrodami (Obr. 19). Orientace desek kondenzátoru je kolmá ke směru osy, ve které má být měřeno zrychlení. Mezi elektrodami je umístěna hmota, která se působením zrychlení vychyluje ze své stabilizované polohy. Tímto vychýlením dojde ke změně vzdálenosti elektrod a následnému zachycení změny kapacity kondenzátoru, která je úměrná aplikovanému zrychlení. Akcelerometry se vyrábí v tzv. hřebenovém zapojení, kde jsou zapojeny desítky až stovky desek paralelně za sebou. Tento typ zapojení poskytuje vyšší citlivost a teplotní stabilitu.



Obr. 19: Kapacitní akcelerometr. Převzato z [27]

## Piezoelektrické akcelerometry

Tyto akcelerometry (Obr. 20) pracují na principu piezoelektrického jevu. Na krystal je připevněna hmota o známé hmotnosti, která je při pohybu akcelerometru vychýlena, přičemž je namáhán krystal buď v tahu nebo v tlaku. Fyzickým namáháním krystalu pak nastává již zmíněný piezoelektrický jev. Výstupem těchto akcelerometrů je elektrický náboj (generovaný na stěnách krystalu) úměrný velikosti aplikovaného zrychlení, který je posléze převeden na napěťový signál [25]. Jejich hlavní nevýhodou je nemožnost měřit statické zrychlení. Důvodem je fakt, že při statickém zrychlení (působení konstantní síly) nevzniká piezoelektrický jev.

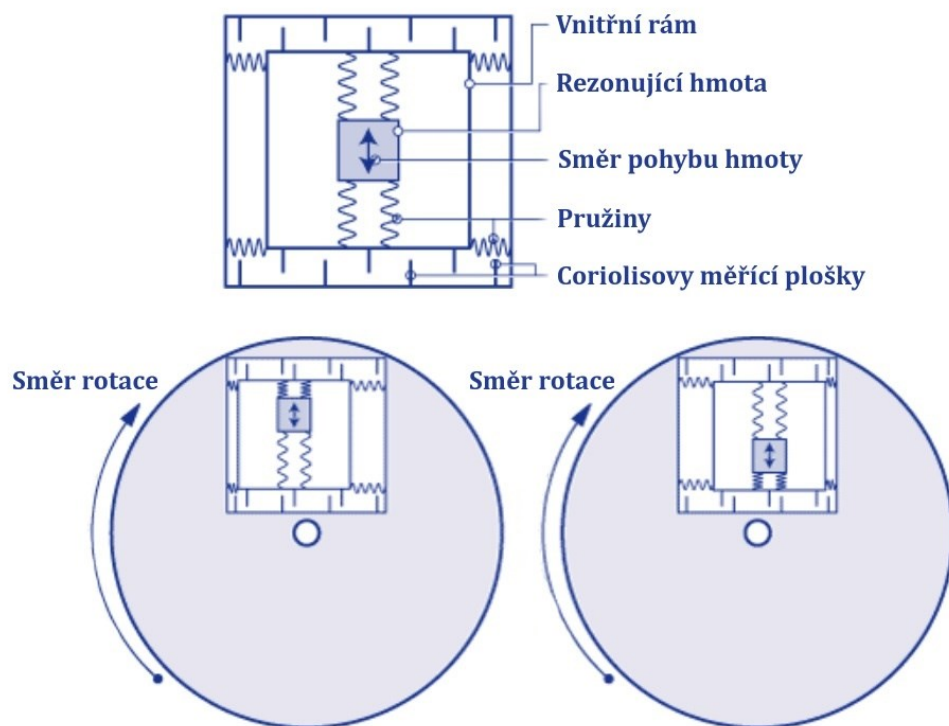


Obr. 20: Piezoelektrický akcelerometr. Převzato a upraveno z [28]

Na podobném principu jako akcelerometrické senzory fungují také senzory gyroskopické. Zatímco u akcelerometrických senzorů je seismická hmota volně umístěná a hýbe se pouze působením vnějších sil (při zrychlení), u gyroskopických senzorů je s touto hmotou záměrně pohybováno, aby zařízení mohlo zjistit náklon objektu. U gyroskopů je nutné zavést pojem „Coriolisova síla“. Jedná se o sílu, která působí na těleso pohybující se v rotující soustavě. Zjednodušeně si tuto sílu lze představit s kuličkou a kruhovým stolem. Pokud by byl stůl v nehybné poloze a my bychom kuličku poslali z jednoho kraje stolu na druhý, kulička by se po trajektorii přímky dostala z bodu A do bodu B. Pokud by však stůl rotoval kolem osy umístěné uprostřed stolu a my bychom kuličku poslali z bodu A stejnou rychlostí jako v předchozím případě, kulička by se dostala do bodu C. Konkrétní princip gyroskopu je naznačen na Obr. 21. Hmota je zde umístěna na pružinách ve vnitřním rámu. Směrem k okraji rotující kružnice na hmotu působí Coriolisova síla směrem doleva (v případě levé kružnice) a směrem doprava (v případě pravé kružnice). Na obrázcích je současně zaznačen i směr pohybu hmoty. Směr i velikost Coriolisovy síly je úměrný směru a rychlosti otáčení – lze tedy určit velikost úhlové rychlosti na základě vztahu (6).

$$F_C = -2 \cdot m \cdot (\omega \times v), \quad (6)$$

kde „ $F_C$ “ je Coriolisova síla, „ $m$ “ je hmotnost hmoty, „ $\omega$ “ je úhlová rychlost a „ $v$ “ je lokální relativní rychlost hmoty.

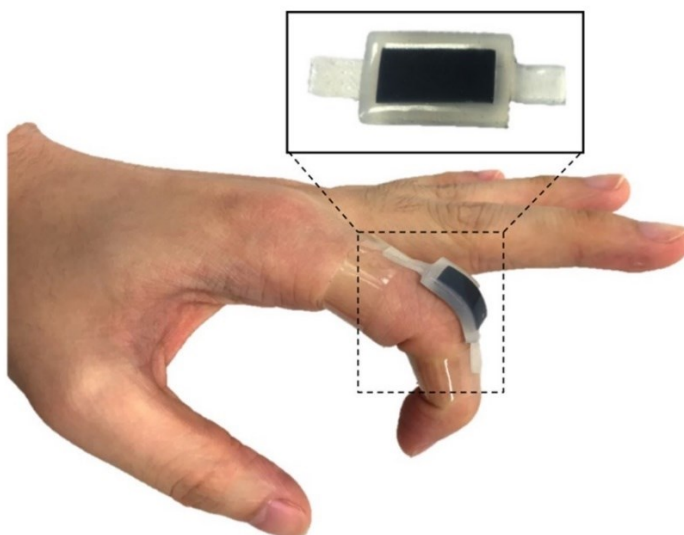


Obr. 21: Princip gyroskopu s využitím Coriolisovy síly. Převzato a upraveno z [29]

Hmota umístěná v rámu rezonuje (periodicky se pohybuje). Směr pohybu hmoty je vždy kolmý ke směru otáčení. Při těchto podmínkách na vnitřní rám působí Coriolisova síla úměrná rychlosti otáčení, kterou je možné změřit pomocí vzájemnému posuvu plošek. Výstup lze charakterizovat jako změnu kapacity úměrnou úhlové rychlosti otáčení [29].

### 3.1.2 Senzory založené na roztažnosti

Tento typ senzorů se využívá k měření tlaku, ohybu, roztažení nebo také síly. Velké uplatnění nacházejí zejména v oblasti robotiky a bezdrátových rukavic ve spojení s virtuální realitou. Z principiálního hlediska se jedná o rezistory, přičemž deformace senzoru je přímo úměrná jeho odporu. Při roztažení se odpor zvyšuje, při stlačení se naopak odpor snižuje. Tyto senzory jsou na trhu dostupné v různých velikostech s různými citlivostmi a pružnostmi. Obecně jsou senzory vyráběny z pružných látek, které jsou potaženy vodivým polymerem nesoucí název polypyrrol [24]. Ukázkou takového senzoru je Obr. 22. Uplatnění těchto senzorů je velmi podobné jako u senzorů založených na ohebnosti, které jsou detailněji rozebrány v kap. 3.1.3.



Obr. 22: Senzor založený na roztlačnosti. Převzato z [30]

### 3.1.3 Senzory založené na ohebnosti

Jedná se o pasivní odporové senzory, které se běžně používají k měření úhlu výchylky daného objektu (např. končetiny lidského těla). Nejčastěji jsou složeny z uhlíkových odporových prvků, které jsou přítomny v daném substrátu (látko podléhající chemické katalytické reakci). Ohyb senzoru má za následek změnu obsahu uhlíku v substrátu, což vede ke změně odporu této sloučeniny.

Tento typ senzorů lze vyrábět dvěma způsoby. Prvním z nich (levnější varianta) je pokládání vodivého odporového inkoustu na substrát. Při ohybu senzoru se pak odporový materiál oddělí, načež se také změní jeho odpor. Druhým způsobem je technologie optických vláken. Senzor se v tomto případě skládá z plastového optického vlákna, světelného zdroje a detektoru fotonů. Fotony světla jsou vysílány z jednoho konce vlákna na druhý, přičemž se při ohnutí senzoru (vlákna) změní intenzita světla dopadajícího na detektor a je registrována flexe. Udávaný životní cyklus senzorů je více než 1 milion ohnutí. Pracovní teplota se pohybuje mezi  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  a jsou schopny pracovat s přesností menší než  $1^{\circ}$  [24].

Příkladem využití těchto senzorů je publikace [15], která je v práci detailněji rozebrána v kap. 2.3. Dalším příkladem využití z oblasti medicíny je [31], ve které byl autory navržen rehabilitační systém pro pacienty po mozkové příhodě. Základním principem tohoto systému je využití senzorů ohybu pro měření kinematiky kloubů a používá se pro trénink komplexních pohybů pacienta v prostředí virtuální reality.

Závěrem jsou tyto senzory vhodné pro detekci gest rukou a měření rozsahu pohybu kloubů. Vzhledem ke své velikosti a délce životního cyklu najdou své uplatnění hlavně na chytrých rukavicích. Ty lze především díky teplotnímu rozsahu,

ve kterém jsou senzory schopny pracovat, využít téměř všude. Bohužel je lze použít pouze v jednom stupni volnosti. Hlavní nevýhodou těchto sensorů je jejich snížená přesnost v průběhu času (používání). Některé senzory také vykazují nelineární trend výstupu při měření malých úhlů ohybu, což může zatížit jejich kalibraci. V neposlední řadě pak senzory vykazují delší dobu odezvy (1 – 2 ms) v důsledku jejich fyzické deformace.

### **3.1.4 Senzory založené na vizuálním vjemu**

Senzory založené na vizuálním vjemu v převážné většině k detekci gest využívají kamery, díky kterým je možné sledovat pohyb rukou nebo jiných končetin. Následuje číslíkové zpracování obrazu, díky kterému jsou detekovány klíčové body při vykonávání gesta. Metod zpracování je v této oblasti celá řada. K rozpoznání gesta mohou být využity techniky založené na kinematickém 3D modelu končetiny využívající prostorové reprezentace gesta. Další možností mohou být techniky založené na vzhledu končetiny. Ty využívají jako vstup obrázku nebo videa a požadované parametry jsou extrahovány díky databázi šablon za současného využití neuronových sítí. Vzhledem k tomu, že detailním popisem konkrétních příkladů využití této sensoriky se v práci již zabývala kap. 2.2, v této kapitole budou pouze shrnuty a stručně popsány vybrané algoritmy využívající odlišný přístup detekce gest rukou za použití různých technik.

Autoři [32] využili část obrazu zachycující barvu kůže k normalizaci celého obrazu pomocí dané části ruky, ve kterém pak gesto detekovali pomocí skrytých Markovových modelů s úspěšností 98 %. Dalším přístupem je [33], kde k rozlišení barevných pixelů kůže od pozadí obrázku využili autoři barevný model YCbCr a neuronovou síť. Přesnost tohoto algoritmu byla 97,4 %. Publikace [34] popisuje využití poměru červené a zelené barvy v obraze k detekci ruky, respektive barvy kůže. Z obrazu je dále detekováno těžiště dlaně, díky čemuž jsou nalezeny špičky prstů. Kolem celé ruky je pak nakreslena kružnice a je detekováno gesto. Tento algoritmus dosahuje přesnosti 98 %. Podobný přístup je využit v [35], který však místo červené a zelené složky obrazu pracuje na vstupu i s modrou složkou a udává přesnost detekce gesta rovných 100 %. Autoři [36] využili k detekci ruky algoritmus Adaptive Boost přímo ze vstupního obrazu. Výhodou je zde možnost detekce více překrývajících se rukou v jednom obraze. Udávaná úspěšnost detekce je 98 %.

## 3.2 Mikrokontrolér TinyPICO ESP32

ESP32 je série čipů, které v sobě integrují mnoho rozhraní nutných k připojení k počítači a jsou schopny bezdrátově komunikovat a řídit požadované periferie. Jedná se o čip od společnosti Espressif Systems, který byl navrhnut za účelem univerzálnosti využití a maximálního výkonu pod taktovkou 40nm výrobního procesu a nízké spotřeby energie za příznivou cenu [37]. ESP32 na trhu najdeme hned v několika variantách (Obr. 23). První z nich jsou SoC, neboli systémy na čipu, druhou jsou moduly a třetí vývojové desky [38].



Obr. 23: ESP32 – čip, modul a vývojová deska. Převzato z [38]

### 3.2.1 Srovnání s ESP32 a ESP8266

Předchůdci ESP32-PICO-D4 (jádro vývojové desky TinyPICO) jsou čipy ESP32 a ESP8266. ESP8266 měl původně sloužit jako doplněk pro bezdrátovou komunikaci pro Arduino, a nakonec se stal samostatně pracujícím modulem. Jádrem čipu ESP8266 je jednojádrový 32-bit procesor Tensilica L106 Diamond běžící na taktu 80 MHz (přetaktování až na 160 MHz) s vestavěnou SRAM a ROM pamětí [39]. Čip již disponuje WiFi funkcionalitou, avšak postrádá technologii Bluetooth. Vstupně-výstupních portů je na tomto čipu 17. Operační paměť, kterou využívá výpočetní část, je sdílená i s WiFi čipem, což může vést k problémovému a nestabilnímu chování hlavně při bezdrátovém přenosu dat.

Nástupcem ESP8266 je již výše zmíněný ESP32, který disponuje dvoujádrovým 32-bit procesorem Xtensa LX6 s frekvencí 160 MHz (přetaktování až na 240 MHz), tedy dvojnásobnou oproti svému předchůdci [37]. Velikost SRAM byla zvýšena z původních 160 kB na 512 kB. Hlavním vylepšením ESP32 je technologie Bluetooth s funkcí BLE (Bluetooth Low Energy), díky které je možné bezdrátově přenášet data i v místech, kde není dostupná WiFi. Byla také vylepšena WiFi část, ve které došlo k rozšíření podporovaného pásma, a to z 20 MHz na 40 MHz spolu s modernějším zabezpečením WPA a WPA2. V neposlední řadě byl vylepšen A/D převodník z 10 bitového na 12 bitový, přibyl 19 vstupně-výstupních portů (jejich celkový počet na ESP32 činí 34) a také přibyl senzor teploty a dotyku [40].

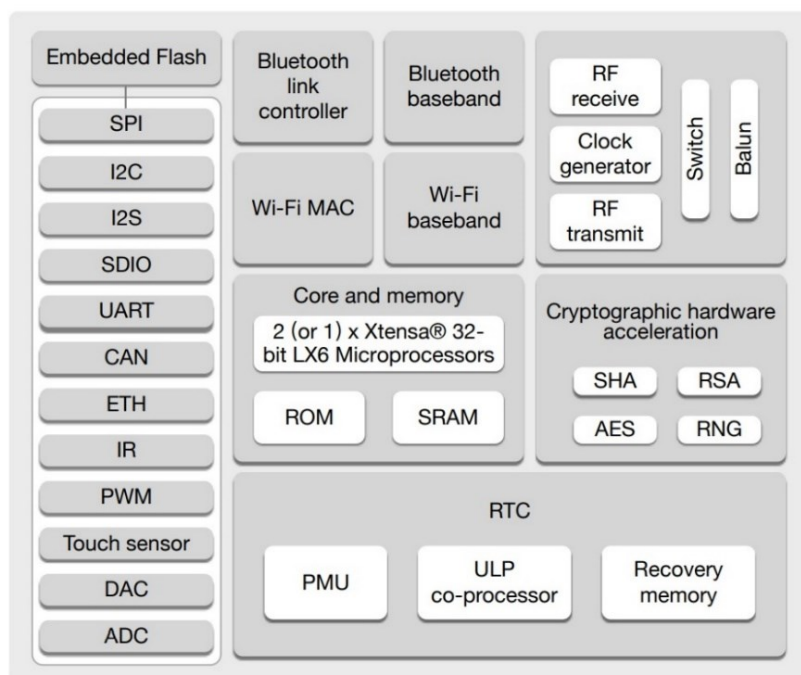
Jádrem desky TinyPICO ESP32, kterou tato práce využívá je – jak již bylo zmíněno – čip ESP32-PICO-D4 [41]. Veškerou funkcionalitu, tak jak je popsána výše, autoři desky přebrali z klasického vývojového kitu ESP32 (známý v několika variantách, např. DevKitC V4). Hlavními rozdíly jsou počet pinů, který byl z původních 40 snížen na 20 (počet vstupně-výstupních portů byl z 34 snížen na 14), menší Flash paměť, a především menší rozměry. Klasické ESP32 váží 9,3 g a jeho rozměry činí 55x26x13 mm, zatímco TinyPICO váží pouhé 2 g a pyšní se rozměry 32x18 mm. Výšku bohužel výrobce neuvádí.

Přehledné srovnání všech tří modelů je možné vidět v Tab. 4. Na Obr. 24 je možné vidět funkční blokové schéma čipu ESP32.

Tab. 4: Srovnání parametrů desek ESP8266, ESP32 a TinyPICO. Převzato a upraveno z [37], [39], [40], [41]

Platforma	ESP8266	ESP32	TinyPICO
<b>Procesor</b>	Tensilica L106	Xtensa LX6	Xtensa LX6
<b>Frekvence procesoru</b>	80 MHz (až 160 MHz)	160 MHz (až 240 MHz)	160 MHz (až 240 MHz)
<b>Velikost SRAM</b>	160 kB	512 kB	520 kB
<b>Velikost Flash paměti</b>	Až 16 MB	Až 16 MB	Až 4 MB
<b>WiFi</b>	802.11 b/g/n, HT20	802.11 b/g/n, HT40	802.11 b/g/n, HT40
<b>Max. rychlost WiFi</b>	130 Mbit/s	300 Mbit/s	150 Mbit/s
<b>Zabezpečení WiFi</b>	WEP	WEP, WPA, WPA2	WEP, WPA, WPA2
<b>Bluetooth</b>	Ne	Bluetooth BLE 4.2	Bluetooth BLE 4.2
<b>Vstupně-výstupní porty</b>	17	34	14
<b>SPI/I2C/I2S/UART</b>	2/1/2/2	4/2/2/2	4/2/2/2
<b>A/D převodník</b>	10-bit	12-bit	12-bit
<b>CAN</b>	Ne	Ano	Ano
<b>Ethernet MAC prostředí</b>	Ne	Ano	Ano
<b>Dotykový senzor</b>	Ne	Ano	Ano
<b>Teplotní senzor</b>	Ne	Ano	Ano
<b>Provozní teplota</b>	-40 °C až 125 °C	-40 °C až 125 °C	-40 °C až 85 °C
<b>Napájení</b>	5 V	5 V	3,0 až 5 V
<b>Pracovní napětí</b>	3,3 V	3,3 V	3,3 V





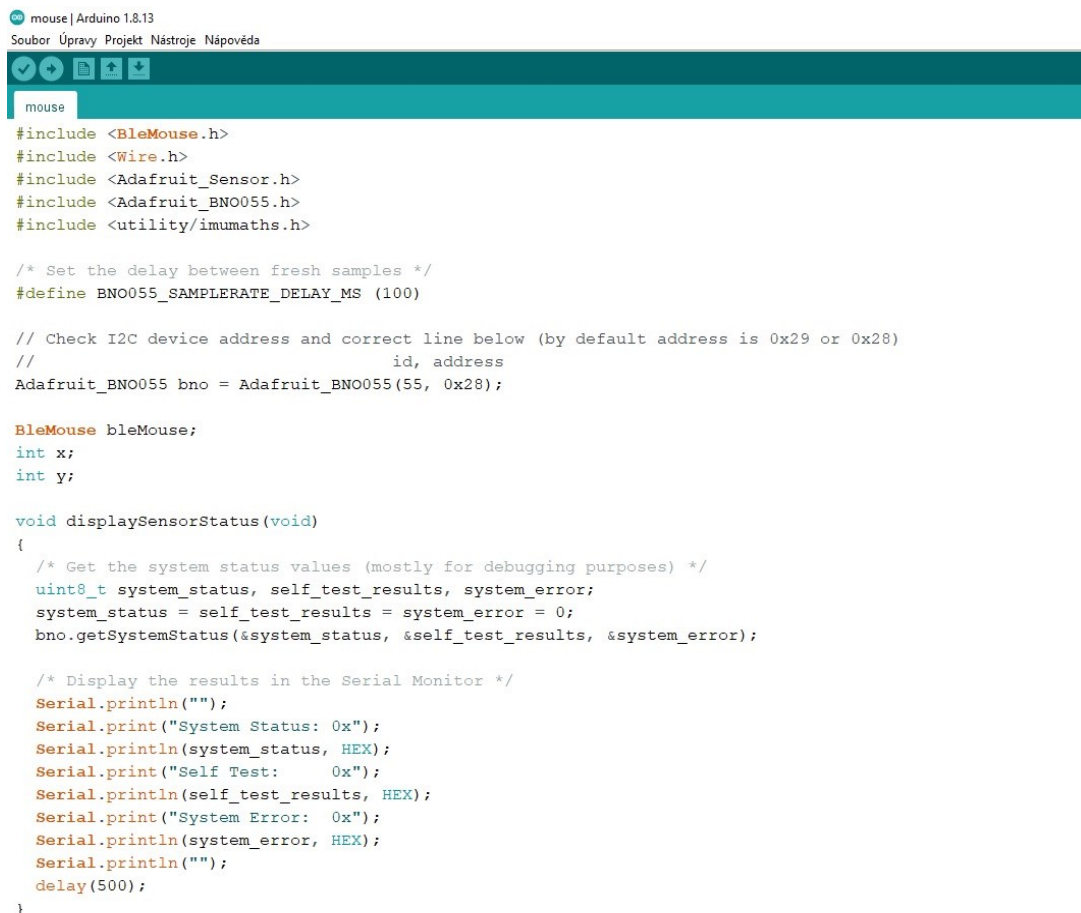
Obr. 24: Funkční blokové schéma ESP32. Převzato z [37]

### 3.2.2 Programování TinyPICO ESP32

Mikrokontrolér je možné programovat hned v několika programovacích jazycích. Jednou z možností je využití jazyka MicroPython, který vychází z programovacího jazyka Python 3 a je optimalizován pro provoz na mikrokontrolerech a v omezených prostředích [42]. Vývoj MicroPythonu započal v roce 2013 (první verze dostupná v roce 2014) a jeho původně cíleným uplatněním měla být pouze platforma Pyboard. Časem se však tento jazyk rozšířil i na další platformy. Cílem MicroPythonu je co největší kompatibilita s běžným Pythonem 3 za současného udržení kompaktnosti, aby dokázal běžet v pouhých 256 kB prostoru pro kód a 16 kB paměti RAM [43]. MicroPython obsahuje po vzoru klasického Pythonu nástroj „uPip“ (v klasickém Pythonu „pip“), díky kterému je možné do zařízení jednoduše stahovat knihovny.

Nejznámější, a také nejpoužívanější možností pro základní využití je však Arduino IDE [44], využívající jazyka C a C++. Kód v programovacím prostředí ArduinoIDE, které bude při programování TinyPICO ESP32 v této práci využito, se skládá z několika částí. Nejprve jsou v kódu deklarovány globální proměnné spolu s inicializací knihoven. Dále je nutné inicializovat vstupně-výstupní porty. Jak deklarace proměnných a knihoven, tak inicializace portů jsou provedeny pouze na začátku a dále se s nimi již nepracuje. Poslední částí je samotný kód programu, probíhající ve „while“ smyčce. Ukázkou programovacího prostředí je možné vidět na Obr. 25.





```
mouse | Arduino 1.8.13
Soubor Úpravy Projekt Nástroje nápověda

mouse

#include <BleMouse.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BNO055.h>
#include <utility/imumaths.h>

/* Set the delay between fresh samples */
#define BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS (100)

// Check I2C device address and correct line below (by default address is 0x29 or 0x28)
//          id, address
Adafruit_BNO055 bno = Adafruit_BNO055(55, 0x28);

BleMouse bleMouse;
int x;
int y;

void displaySensorStatus(void)
{
  /* Get the system status values (mostly for debugging purposes) */
  uint8_t system_status, self_test_results, system_error;
  system_status = self_test_results = system_error = 0;
  bno.getSystemStatus(&system_status, &self_test_results, &system_error);

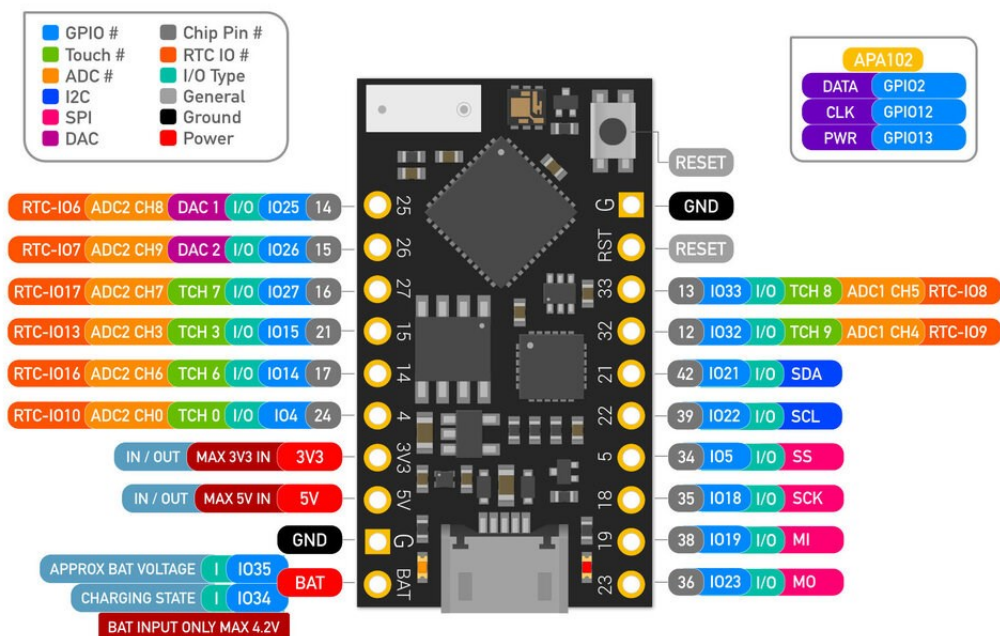
  /* Display the results in the Serial Monitor */
  Serial.println("");
  Serial.print("System Status: 0x");
  Serial.println(system_status, HEX);
  Serial.print("Self Test:      0x");
  Serial.println(self_test_results, HEX);
  Serial.print("System Error:  0x");
  Serial.println(system_error, HEX);
  Serial.println("");
  delay(500);
}
```

Obr. 25: Ukázka programovacího prostředí Arduino IDE 1.8.13

### 3.2.3 Piny a sběrnice na TinyPICO ESP32

Samotný ESP32 čip obsahuje 20 pinů disponujících různými funkcemi. Ne všechny z nich však mohou být využity na vývojových deskách a některé z nich dokonce nemohou být vůbec použity.

Jak již bylo zmíněno v kap. 3.2.1, vývojová deska TinyPICO ESP32 obsahuje několik typů periférií (sběrnic) a 14 vstupně-výstupních pinů, jejichž rozložení je možné vidět na Obr. 26. V této kapitole budou detailněji rozebrány funkce pinů a popsány jednotlivé periferie.



Obr. 26: Rozložení pinů na vývojové desce TinyPICO ESP32. Převzato z [45]

## Piny

Na desce se nachází 14 vstupně-výstupních pinů. Jsou zde také 2 kanály ADC1 převodníku a 6 kanálů ADC2 převodníku. Všechny z nich mají 12-bit rozlišení, tudíž je možné se pohybovat v rozmezí hodnot 0 až 4095 (hodnota 0 odpovídá napětí 0 V a hodnota 4095 odpovídá napětí 3,3 V). Po boku A/D převodníků se také nacházejí dva D/A převodníky s rozlišením 8-bit. Na TinyPICO ESP32 lze také najít 6 kapacitních snímačů, které lze integrovat do kapacitních podložek a využít jako mechanická tlačítka. Tyto snímače mohou snímat cokoli, vytváří a drží elektrický náboj (lidská kůže). V neposlední řadě je lze využít k probuzení TinyPICO ESP32 z režimu hlubokého spánku. Dále jsou zde piny strapovací, které se využívají k uvedení TinyPICO ESP32 do flash módu, popř. nahrání nového programu a RTC piny, které zůstávají funkční i při přepnutí zařízení do režimu hlubokého spánku a mohou být využity právě k probuzení TinyPICO ESP32. Díky pinům 3V3 a 5V lze jak napájet desku, popř. – je-li deska již napájena jiným pinem – lze těmito piny napájet jiná zařízení. Konkrétně v této práci je využit právě pin 3V3 k napájení IMU senzoru (viz. kap. 4). Posledním zajímavým pinem je pin BAT, díky kterému je možné napájet desku pomocí baterie, disponující vstupním napětím max. 4,2 V. Tímto pinem je také možné po připojení 5V zdroje napětí baterii dobíjet.

## **Sběrnice SPI**

Jedná se o sériové synchronní (periferní) rozhraní, u kterého jsou všechna zařízení připojena na stejnou sběrnici, přičemž zde charakterizujeme zařízení řídící a zařízení podřízená, která jsou řízena právě řídícím zařízením. Řídícímu zařízení se také říká „Master“ a lze ho považovat za tzv. iniciátora komunikace. Podřízeným zařízením se říká „Slave“ a může jich být více. Principem přenosu je zasílání čtyř druhů signálu ze zařízení typu Master do všech periferních zařízení typu Slave. Jedná se o hodinový signál (SCK), přičemž jsou všechny ostatní signály synchronizované právě s tímto. Dalšími signály jsou signál CS (signál pro výběr zařízení), MISO (signál pro příjem dat na straně řídícího zařízení) a MOSI (signál pro odesílání dat z řídícího zařízení) [46]. Sběrnice SPI je charakterizována vysokými přenosovými rychlostmi a jednoduchým konceptem. Hlavní nevýhodou je pak potřeba dalšího signálního vodiče pro každé další Slave zařízení. Sběrnice tak není vhodná pro komunikaci většího počtu zařízení.

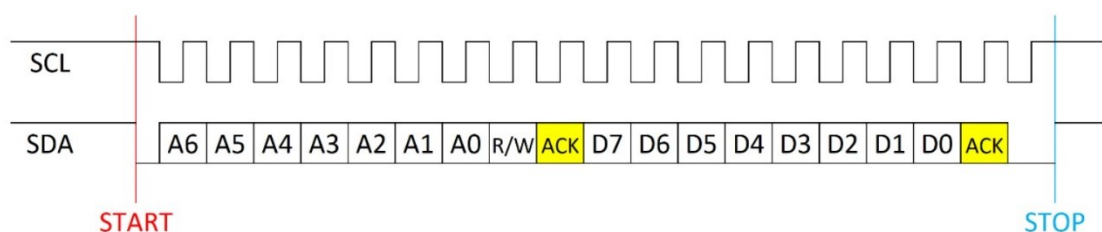
## **Sběrnice UART**

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), neboli univerzální asynchronní přijímač a vysílač zajišťuje komunikaci mezi dvěma zařízeními, přičemž vysílací a přijímací linka je oddělena [46]. Principem je přenos jednoho bajtu dat, který se po bitech v sekvenci přenáší po lince. Zařízení umožňuje současné vysílání dat z obou zařízení. Pokud dané zařízení nevysílá, je na lince hodnota logické 1. Pro synchronizaci vysílání a příjmu slouží dva bity – START a STOP. Pro přenos je tedy nejdříve poslán START bit (log. 0). Obvykle je poslán celý bajt dat, tedy 8 bitů, v nichž prvním bitem je LSB (bit, který má nejmenší váhu) a posledním MSB (bit s největší váhou). Ještě před zakončením přenosu je zaslán paritní bit, který slouží pro detekci chyb při čtení dat a volí se tak, aby celkový počet logických 1 byl v celé zprávě buď lichý nebo sudý. Přenos je následně zakončen STOP bitem (log. 1). Přenosová rychlost se uvádí v jednotkách Baud (symboly za sekundu). U většiny zařízení kvůli jednoduchému dvoustavovému přenosu odpovídá 1 Baud rychlosti 1 bit/s.

## **Sběrnice I2C**

Díky této sběrnici je obecně možné propojit jedno řídící zařízení s více podřízenými, tak jak je tomu v případě sběrnice SPI, přičemž je zde umožněna obousměrná komunikace. Propojit je možné různé druhy displejů, integrované obvody, potenciometry nebo jiná vstupně-výstupní zařízení. Komunikaci lze však zajistit pouze na velmi krátké vzdálenosti, a to desítky cm.

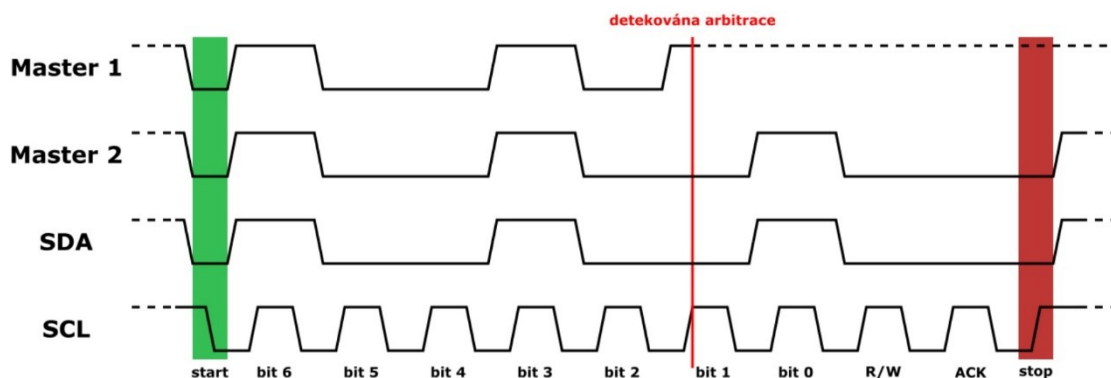
Pro komunikaci jsou zde stěžejní dva datové signály – SDA (sériová data) a SCL (sériové hodiny) [47]. Oba signály jsou obousměrné. První z nich – signál SDA – slouží k odesílání dat. Druhý signál – SCL – slouží k přenosu hodinového signálu z řídicího zařízení do zařízení podřízeného a zajišťuje synchronizaci obou signálů. V případě obou signálů je pak nutná přítomnost pull-up rezistorů, díky kterým je sběrnice udržována v klidovém stavu (log. 1). Každé z připojených zařízení má adresu o délce 7 bitů. 8. bitem (R/W) je pak zastoupena hodnota log. 0 pro zápis nebo log. 1 pro čtení (určuje tedy směr přenosu dat) a 9. bit je bitem potvrzovacím (ACK), kterým podřízené zařízení potvrdí řídicímu zařízení, že je připraveno ke komunikaci. Master zařízení pak při zahájení komunikace nejdříve odvysílá adresu zařízení, se kterým chce navázat komunikaci a určí, zda se bude jednat o zápis nebo čtení. Jakákoliv komunikace je zahájena změnou stavu SDA signálu na log. 0, přičemž SCL signál setrvává stále na hodnotě log. 1. Komunikace je pro ucelnější představu zobrazena na Obr. 27.



Obr. 27: Přenos adresy zařízení a dat pomocí I2C sběrnice. Převzato z [47]

Sběrnice I2C umožňuje čtyři přenosové rychlosti. 100 kbit/s ve Standart módu, 400 kbit/s ve Fast módu, 1 Mbit/s ve Fast Plus módu, 3,4 Mbit/s v High módu a 5 Mbit/s v Ultra Fast módu. Všechny módy umožňují obousměrnou komunikaci až na Ultra Fast, ten umožňuje pouze komunikaci jednosměrnou [48]. Na základě požadované rychlosti sběrnice je nutné zvolit vhodné pull-up rezistory. Čím nižší je hodnota odporu rezistoru, tím rychleji proběhne změna stavu (z log. 0 na log. 1), čímž se pochopitelně zvýší přenosová rychlost.

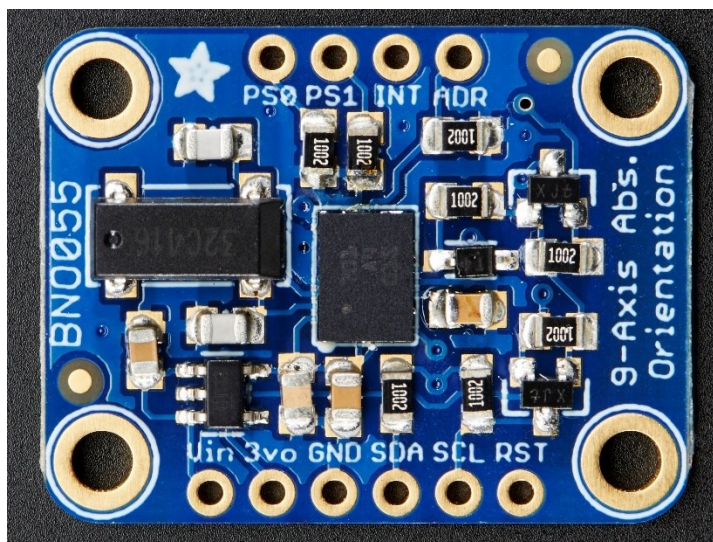
Tato sběrnice je typu multi-master. Tato vlastnost sběrnici dovoluje připojení více zařízení typu Master, která mohou zahájit komunikaci [46]. Je nutné však myslet na možnou kolizi dvou a více zařízení, ke které může jednoduše dojít, pokud obě zařízení typu Master ve stejný moment zahájí komunikaci. Proces, kterým se tento typ sběrnice proti možné kolizi brání se nazývá arbitrace. Při vysílání adresních bitů hlídá sběrnice napětíovou úroveň signálu SDA. Za aktivního stavu je vysílána pouze log. 0. V momentě, kdy by měla být sběrnice ve stavu log. 1 (zajištěné pull-up rezistory), ale nachází se ve stavu log. 0, sběrnice detekuje další vysílač (první Master zařízení). První Master zařízení detekuje arbitraci, ukončí vysílání a druhé Master zařízení může vysílat nadále bez kolize.



Obr. 28: Detekce arbitrace sběrnici I2C. Převzato z [46]

### 3.3 BN0055

Předcházející kapitola se zabývala teoretickým rozбором vývojové desky ESP32, která v tomto zařízení zajišťuje zpracování dat a komunikaci s počítačem. Samotná deska však nedisponuje jednotkou, díky které by bylo možné snímat potřebná gyroskopická a akcelerometrická data. Tuto úlohu v zařízení zastupuje IMU senzor BN0055 (Obr. 29) od společnosti Adafruit, který s deskou komunikuje pomocí již výše zmiňované sběrnice I2C.



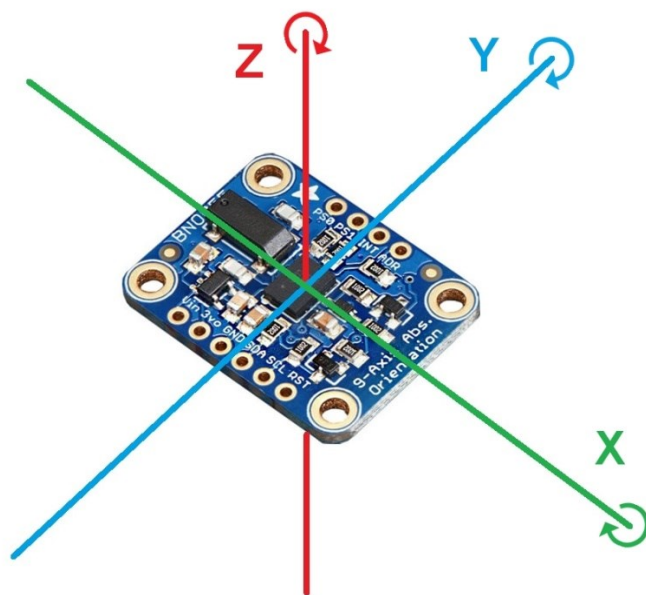
Obr. 29: IMU senzor Adafruit BN0055. Převzato z [49]

Díky IMU (Inertial Measurement Unit, v překladu setrvačná měrná jednotka) senzorům je možné měřit akcelerometrická, gyroskopická a magnetometrická data a mají v praxi mnoho využití. Příkladem je [50], kde autoři této práce využili senzor MPU-6050 společně s GPS modulem ke sledování pohybujícího se objektu



v prostoru, přičemž byli schopni určit, v jaké výšce, při jakém náklonu a s jakým zrychlením se objekt v daný čas pohyboval.

Základní vlastností každého IMU senzoru je počet tzv. stupňů volnosti, neboli DOF (Degrees Of Freedom). Tyto stupně udávají všechny možné pohyby tělesa ve 3D prostoru. Lze tedy určit 6 stupňů volnosti, tři z nich pro lineární pohyb (dopředu/dozadu, nahoru/dolů a doleva/doprava) a další tři pro pohyb rotační v osách „x“, „y“ a „z“. Konkrétně BNO055 lze označit jako 9-DOF, protože disponuje 9 stupni volnosti [51]. Otázkou tedy je, kde se vzaly další tři stupně volnosti, pokud lze jakýkoliv pohyb tělesa v prostoru popsat pouhými šesti stupni. Odpovědi jsou magnetometrická data. Díky BNO055 totiž lze ve třech osách měřit akcelerometrická, gyroskopická i magnetometrická data. Možným 10. DOF může být přidání senzoru atmosférického tlaku pro měření nadmořské výšky. Gyroskopická data uvádějí změnu úhlu polohy, akcelerometrická zrychlení senzoru a magnetometrická pak sílu magnetického pole. V neposlední řadě tento senzor disponuje také teploměrem, díky kterému je možné měřit teplotu okolí. Na ten se však osobně nedoporučuji spoléhat, protože při testování v pokojových teplotách zobrazoval teploty dosahující 40 °C. Tyto hodnoty jsou nejspíše zkresleny vlivem okolních zahřívajících se součástí na senzoru. Mezi jeho přednosti patří rozhodně velikost. Senzor měří 27 mm na délku, 20 mm na šířku a pouhé 4 mm na výšku. Jeho váha je 3 g. Senzor BNO055 je možné zařadit do kategorie chytrých senzorů, protože v sobě již skrývá svůj vlastní mikroprocesor (ARM Cortex M0 MCU), který zajišťuje předzpracování dat [49], [52]. Maximální vzorkovací frekvence senzoru je 100 Hz, v případě měření vektoru magnetického pole 20 Hz a pro teplotní senzor pak pouhý 1 Hz [49]. Osovou orientaci senzoru v prostoru je možné vidět na Obr. 30.



Obr. 30: Orientace BNO055 v prostoru

### 3.3.1 Srovnání s jinými IMU senzory

IMU senzorů je na trhu v dnešní době celá řada. Tato kapitola se bude zabývat srovnáním BNO055 se čtyřmi dalšími hojně využívanými modely. Senzorem, který se v této práci již několikrát objevil ve zmíněných publikacích je senzor MPU-6050. Dalšími z vybraných senzorů pro srovnání budou MPU-9250, LSM9DS1 a MM7150. Přehled všech senzorů a jejich základních parametrů je možné vidět v Tab. 5. Jedná se však pouze o čipy, nikoliv čip implementován na desce, tak jak je tomu na Obr. 29.

Tab. 5: Srovnání BNO055 s dalšími IMU senzory [51], [53], [54], [55], [56], [57]

Parametr/Čip	BNO055	MPU6050	MPU9250	MM7150	LSM9DS1
Výrobce	Bosch	TDK I.S.	TDK I.S.	Microchip	STM electr.
Rozměry [mm]	3,8x5,2x1,1	4,0x4,0x0,9	3,0x3,0x1,0	17,0x17,0	3,5x3,0x1,0
Počet DOF	9	6	9	9	9
Sběrnice	HID-I2C, I2C, UART	I2C	I2C, SPI	I2C	I2C, SPI
Rozlišení	16-bit	16-bit	16-bit	32-bit	16-bit
Akcelerometr	±2g – ±16g	±2g – ±16g	±2g – ±16g	±2g	±2g – ±16g
Gyroskop	±125 °/s – ±2000 °/s	±250 °/s – ±2000 °/s	±250 °/s – ±2000 °/s	0 °/s – ±2000 °/s	±245 °/s – ±2000 °/s
Magnetometr	±1300 μT – ±2500 μT	–	0 μT – ±4800 μT	±1300 μT – ±2500	0 μT – ±1600 μT
Vstupní napětí	2,4 – 3,6 V	2,4 – 3,5 V	2,4 – 3,6 V	2,3 – 3,6 V	1,9 – 3,6 V
Pracovní teplota	-40 – 85 °C	-40 – 105 °C	-40 – 85 °C	0 – 70 °C	-40 – 85 °C
Váha	150 mg	130 mg	110 mg	–	22 mg
Cena	230 Kč,-	167 Kč,-	197 Kč,-	647 Kč,-	140 Kč,-

Z Tab. 5 je patrné, že všechny vybrané čipy mají podobné vlastnosti. Výjimkou je čip MM7150, který se od ostatních čipů odlišuje svou provozní teplotou, velikostí a cenou. Novinkou na trhu je čip LSM9DS1, který se vyznačuje velmi nízkou vahou i rozměry a dispozicí SPI sběrnice. Od ostatních čipů se také odlišuje větším rozsahem možného vstupního napětí a i přes všechny tyto vlastnosti je ve srovnání s dalšími čipy nejlevnější. Při srovnání námi vybraného čipu pro tuto práci – BNO055 – s ostatními čipy se zdá být náš čip vyhovující. Ceny jednotlivých čipů byly převzaty z [54].

### 3.3.2 Piny na BNO055

Na senzoru (Obr. 29) je možné nalézt 10 pinů. V této kapitole budou stručně popsány funkce jednotlivých pinů [49]. Jedná se o piny PS0 a PS1 (díky kterým lze měnit režim komunikace), pin INT (výstupní interrupt), pin ADR (sloužící ke změně výchozí adresy I2C sběrnice, která je z výroby nastavena na hodnotu 0x28), pin RST (pro resetování senzoru) a pin 3vo (výstupní pin disponující výstupním napětím 3,3 V, díky kterému lze napájet další zařízení). Pro tuto práci budou stěžejní piny Vin, GND, SDA a SCL, díky kterým je zajištěno napájení, uzemnění a komunikace s ESP32 přes I2C sběrnici.

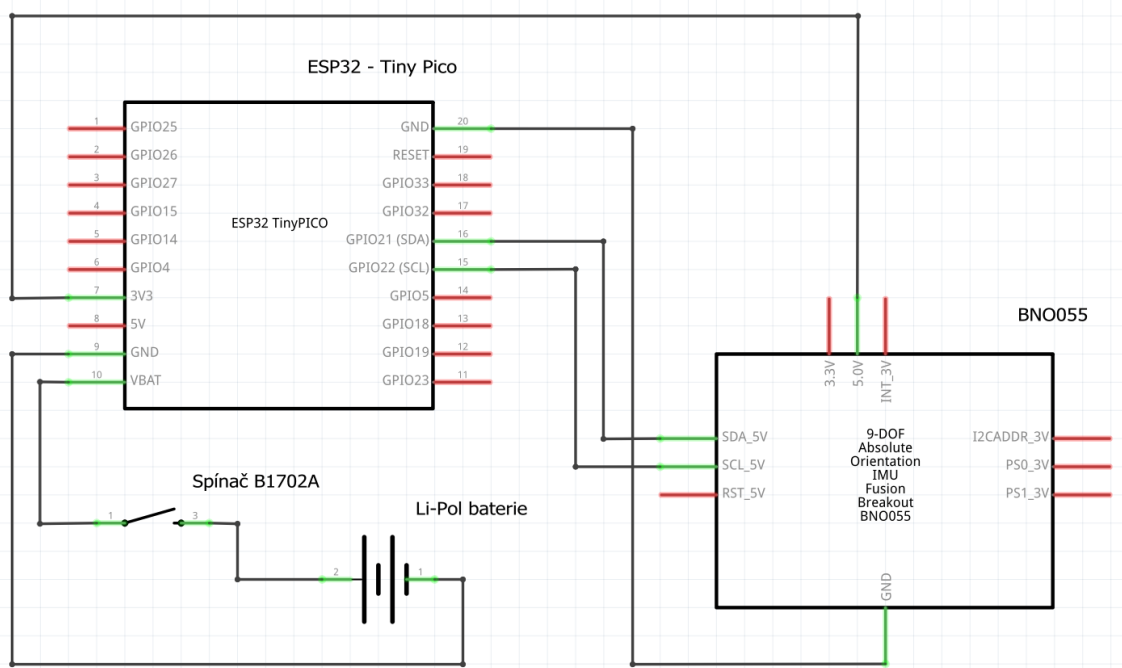


## 4 NÁVRH A REALIZACE ZAŘÍZENÍ

Cílem této práce je navrhnout zařízení, díky kterému bude možné bezkontaktně ovládat počítačovou prezentaci. Zařízení by po připojení přes Bluetooth rozhraní mělo umožnit uživateli pohyb myši na monitoru pomocí jednoduchého pohybu ruky do stran, otevření prezentace a její následné spuštění. Díky navrženým gestům by pak mělo být možné v prezentaci posouvat slidy dopředu i dozadu, podat laserové ukazovátka a také prezentaci zavřít. Takové zařízení by mělo být z důvodu umístění na ruku lehké a algoritmicky sofistikované, vzhledem k možné záměně gest používaných k ovládání prezentace za jakýsi přirozený projev gestikulace při prezentování.

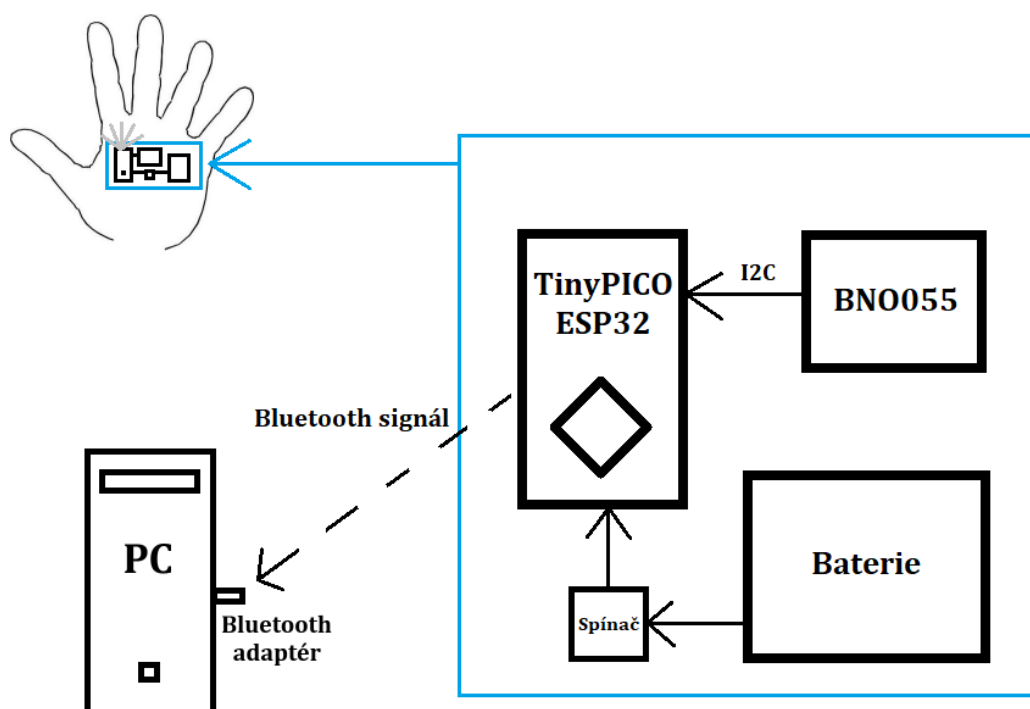
### 4.1 Zapojení komponent

Navržené zařízení využívá vývojové desky TinyPICO ESP32 (dále jen TinyPICO) v kombinaci s IMU senzorem Adafruit BNO055. Obě tato zařízení jsou v práci teoreticky popsána, a to v kapitolách 3.2 a 3.3. Samotné napájení je řešeno lithium-polymerovou baterií LP503040 s kapacitou 550 mA a napětím 3,7 V, která je přes pin VBAT (GPIO34/35) propojena s TinyPICO. Díky funkci tohoto pinu lze baterii také nabíjet připojením microUSB kabelu do ESP32. Mezi baterii a TinyPICO je zaveden dvoupolohový spínač s aretací (B1702A), díky němuž lze celé zařízení zapnout nebo vypnout. Senzor BNO055 je pak napájen z vývojové desky TinyPICO. Pro napájení BNO055 je využito 3V3 pinu na ESP32, který je vyveden na Vin pin IMU senzoru (označován jako 5V, protože je schopen pracovat se vstupním napětím 3,3 – 5,0 V). 3V3 pin TinyPICO poskytuje výstupní napětí 3,3 V. BNO055 je uzemněno na TinyPICO pomocí jednoho z GND pinů (celkem jsou na desce dva). Schéma propojení těchto dvou komponent společně s napájením je možné vidět na Obr. 31 (schéma bylo vytvořeno pomocí programu Fritzing).



Obr. 31: Schéma propojení ESP32, BNO055, spínače a baterie

Vývojová deska s IMU senzorem, který poskytuje vstupní data z gyroskopu a akcelerometru spolu komunikují přes I2C sběrnici, konkrétně pomocí datových linek SDA a SCL (podrobněji rozebrány v kap. 3.2.3). Na BNO055 jsou tyto piny označeny příslušnou trojkombinací písmen, na ESP32 toto pravidlo již neplatí a jsou zde z výroby nastaveny na GPIO 21 pro SDA a GPIO 22 pro SCL (Obr. 26). Tato data jsou pak v TinyPICO algoritmicky zpracována a převedena na instrukci, která je následně odeslána do počítače pomocí Bluetooth rozhraní. Zde nastává jistá nevýhoda, a to nutnost připojení externího Bluetooth adaptéru v případě použití zařízení s klasickým desktopovým PC. V případě většiny moderních laptopů již není nutné tento problém řešit, protože mají Bluetooth modul integrován. Základní blokové schéma zařízení je možné vidět na Obr. 32.



Obr. 32: Blokové schéma zařízení

## 4.2 Návrh a detekce gest

Pro intuitivní a jednoduché ovládání počítače a prezentace je nutné navrhnout patřičná gesta, která budou snadno detekovatelná. Tato gesta by si však algoritmus neměl plést s náhodnými pohyby rukou u přednášení – tedy volném pohybu, proto je při jejich návrhu kladen velký důraz na rychlost a originalitu daného pohybu. Taktéž by měla být gesta pro uživatele pohodlná. Příkladem může být návrh gesta pro pohyb myši na monitoru, kdy by bylo pro uživatele velmi nepohodlné a rovněž nepraktické mít předpaženou ruku před obličejem a vykonávat pohyb nahoru, dolu a do stran, tak jak tomu bylo u technologických vynálezů na počátku 21. století. Toto zařízení disponuje sedmi funkcemi. Pro každou funkcionalitu je samozřejmě navržen jiný typ pohybu. Pro každé gesto je využito jiného typu (akcelerometrická, gyroskopická, polohová), popř. kombinace dat. Některá z gest jsou dynamická, při nichž je nutné rukou nebo dlaní hýbat v daném směru a rozsahu, některá jsou pak statická, při nichž je nutné dlaň po určitou dobu podržet v dané poloze (viz. přiložené obrázky gest). Přehled navržených gest a jim odpovídající instrukce lze vidět v Tab. 6. Při navrhování jednotlivých gest bylo požádáno několik uživatelů o provedení jednotlivých pohybů. Díky těmto datům bylo možné provést detailnější datovou analýzu pro daná gesta.

Tab. 6: Přehled navržených gest a instrukcí

Gesto	Instrukce
Pohyb dlaní do stran	Pohyb myši
Jemné zatřesení dlaní do stran	Klik myši
Pozdvižení předloktí (přibližně o 90°)	Spuštění prezentace
Odklonění dlaně doleva před tělo a zpět	Posun prezentace vpřed
Odklonění dlaně doprava od těla a zpět	Posun prezentace vzad
Předpažení ruky (přibližně na 1 s)	Aktivace/deaktivace laser. ukazovátka
Odklon dlaně dozadu (přibližně na 1 s)	Zavření prezentace

Jednotlivá gesta jsou představena na fotografiích Obr. 34, Obr. 36, Obr. 39, Obr. 42, Obr. 45, Obr. 48 a Obr. 52 níže v této kapitole. Na fotografiích jsou naznačeny pohyby ruky pro všech sedm instrukcí. U každého gesta jsou také graficky znázorněna polohová nebo akcelerometrická data pro tři osy pohybu (x, y, z) (Obr. 35, Obr. 37, Obr. 40, Obr. 43, Obr. 46, Obr. 49, Obr. 50, Obr. 53 a Obr. 54). Tato data vznikla zprůměrováním dat z pěti zaznamenaných pohybů pro každé gesto. Nutno podotknout, že se jedná o surová a nefiltrovaná data nasnímaná se vzorkovací frekvencí 20 Hz. Tab. 7 ukazuje úsek dat získaných na výstupu senzoru BN0055. Jedná se o čas a náklon senzoru ve stupních pro jednu sekundu průběhu gesta pro posun prezentace vzad.

Tab. 7: Polohová data ze senzoru BN0055

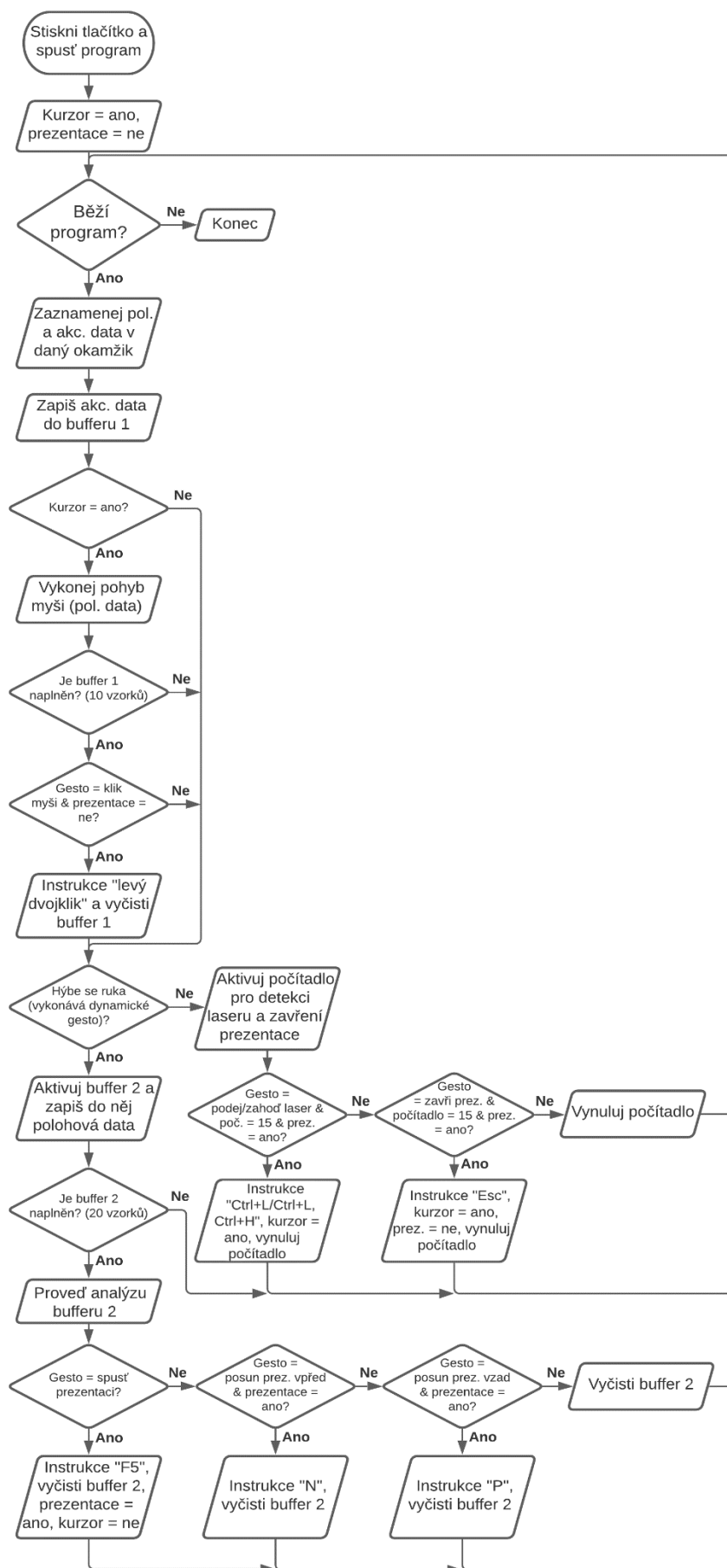
Čas [h:m:s:ms]	Úhel – osa X [°]	Úhel – osa Y [°]	Úhel – osa Z [°]
22:51:55.294	207	5.375	-80.125
22:51:55.340	207.125	5.3125	-80.0625
22:51:55.434	207	5.3125	-79.4375
22:51:55.480	207.3125	5.4375	-77.8125
22:51:55.527	207.5	6.9375	-75.0625
22:51:55.575	210.1875	10.1875	-69.5
22:51:55.621	213.6875	16.125	-65.375
22:51:55.667	218.8125	24.4375	-61.8125
22:51:55.714	224.375	34.1875	-62
22:51:55.761	230.25	43.75	-66.4375
22:51:55.807	236.375	50.6875	-74.6875
22:51:55.853	243.1875	55	-87.0625
22:51:55.946	252.25	55.5625	-99.9375
22:51:55.992	263.5	52.625	-113.5
22:51:56.040	277.25	47.5625	-119.625
22:51:56.076	292.3125	42.875	-122.625
22:51:56.115	303.5	39.625	-121.5

Výchozí bod, ve kterém je nutné gesto začít je na obrázcích vždy naznačen bílým kolečkem. Následná orientace pohybu je pak naznačena šipkami. Pro správnou detekci pohybu je nutné pohyb provést v plném rozsahu, ne příliš pomalu, taktéž však ne příliš rychle. Průměrná délka jednoho pohybu by se měla pohybovat v rozsahu 0,8 – 1,2 s. V datech vyobrazených na obrázcích níže jsou již červeně vyhrazeny úseky signálů, na jejichž detekci bude algoritmus v této práci zaměřen. Z každé strany grafu je uvažován počátek a zakončení gesta, tedy ruka ve volně svěšené pozici po dobu cca 300 – 600 ms.

Je nutné si uvědomit, že hodnoty v osách „y“ a „z“ budou v počátku vždy stejné. Hodnota v ose „x“ se však bude měnit v závislosti rotace senzoru v prostoru. Bude-li tedy tělo uživatele směřovat k objektu „A“, a poté se otočí k objektu „B“ (při zachování polohy dlaně vůči tělu), přičemž tyto dva objekty spolu svírají úhel 60°, hodnota v ose „x“ se sníží/zvýší právě o oněch 60° a hodnoty v osách „y“ a „z“ zůstanou stejné. Tuto skutečnost bylo nutné v programu opatřit, protože by při standartním zachování podmínek nebylo možné s osou „x“ u detekce gest pracovat – docházelo by totiž ke skokovým změnám signálu (např. z 350° na 5° při vzestupu signálu). Toto chování je pro senzor normální, avšak pro signálové zpracování ne příliš pohodlné. Program je tak opatřen vlastním algoritmem, který jakýkoliv detekovaný signál polohových dat v ose „x“ automaticky převede na počátek v úhlu 180°.

Průběh zpracování signálů a vykonání instrukcí lze vidět na vývojovém diagramu programu na Obr. 33. Nejdříve je stiskem tlačítka spuštěn program, čímž se na TinyPICO aktivuje Bluetooth modul a dojde k navázání spojení s PC. Automaticky jsou inicializovány proměnné „kurzor“ a „prezentace“ na „true“ a „false“. Dojde k zaznamenání akcelerometrických i polohových dat v daný okamžik a je-li kurzor aktivní (ihned po zapnutí zařízení vždy), dojde k pohybu kurzoru na základě polohových dat. Akcelerometrická data jsou vždy bez jakékoliv závislosti kontinuálně ukládána do bufferu 1 obsahujícího 10 vzorků signálu. Tento buffer se vždy po naplnění (každých 0,5 s) analyzuje a vyčistí. Je-li z tohoto bufferu detekována instrukce pro dvojklik myši, program je ještě dotázán na podmínku nespouštěné prezentace (není žádoucí klikat myší při prezentování). Poté je na základě akcelerometrických dat v každém okamžiku detekován pohyb ruky provádějící dynamické gesto. V tomto bodě program rozliší detekci gest dynamických (spuštění prezentace, posun prezentace vpřed nebo vzad) a gest statických (aktivace/deaktivace laseru, ukončení prezentace). Je-li detekován počátek gesta dynamického, aktivuje se buffer 2 obsahující 20 vzorků signálu polohových dat. Při plnění tohoto bufferu je neustále nutné udržovat ruku v pohybu. Po naplnění bufferu 2 dojde k jeho analýze, případné detekci jednoho z gest a následně k vyčištění tohoto bufferu. Pokud je z akcelerometrických dat detekována nehybná ruka, program ověří podmínky splnění detekce jednoho ze statických gest

na základě polohy senzoru v prostoru. Jsou-li tyto podmínky splněny, aktivuje se počítadlo, které pro úspěšnou detekci gesta musí nabývat hodnoty 15. Při vzorkovací frekvenci 20 Hz to odpovídá časovému úseku 750 ms, po který ruka musí zůstat v nehybné, předem stanovené poloze. Při detekci jednoho z gest je opět odeslána instrukce do počítače a počítadlo je vynulováno. Instrukce je vždy počítači zadána jako emulace klávesnice nebo myši. Pokud tedy zařízení detekuje start prezentace, instrukce zaslaná počítači odpovídá stisku klávesy F5 na klávesnici. Instrukce je na monitoru počítače provedena okamžitě, bez jakékoliv prodlevy po vykonání gesta. Opakovaným stiskem tlačítka dojde k odstavení napájení zařízení, a tedy k vypnutí programu.



Obr. 33: Vývojový diagram programu

## Pohyb myši

Základní funkcí zařízení je pohyb myši. Díky této funkcionalitě je možné ihned po připojení zařízení k počítači přes Bluetooth rozhraní ovládat počítač bez jakéhokoliv dalšího příslušenství. Výchozí polohou, ve které se myš nehýbe, je volně svěšená paže podél těla. Jakékoliv vychýlení dlaně do stran pak zajistí pohyb myši, přičemž je tento pohyb přímo reflektován na monitor. Vychýlením dlaně doleva se tedy myš pohne doleva. Pro ucelenou představu je na Obr. 34 znázorněn pohyb do čtyř stran, v reálu je však možné dlaní hýbat jakýmkoliv směrem, přičemž myš na monitoru následuje pohyb ruky. Nutno podotknout, že je nutné hýbat pouze dlaní, nikoliv celou paží.



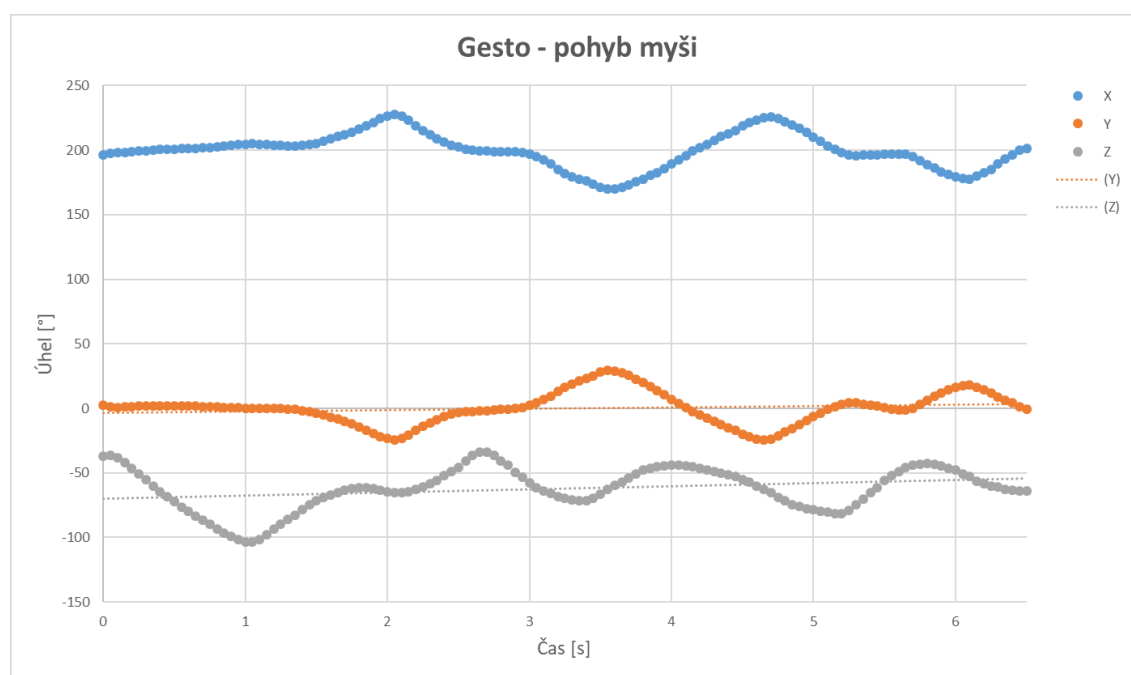
Obr. 34: Znázornění gesta pro pohyb myši

Pro pohyb myši jsou využita polohová data z osy „y“ a „z“. Osa „x“ v tomto případě nemá na pohyb myši žádný vliv. S dlaní je tedy možné volně rotovat, aniž by došlo k ovlivnění této funkcionality (právě rotace dlaně lze využít při kliku myši – viz. následující gesto). U výchozí polohy dlaně s volně svěšenou paží by tedy hodnoty v osách y a z měly být nulové, aby kurzor myši stál na místě. Tento fakt dokazuje lineární spojnice trendu pro osu „y“ na Obr. 35. Jak je však patrné z vizualizace surových dat (Obr. 35), hodnota spojnice trendu pro osu „z“ nabývá hodnoty přibližně  $-60^\circ$ . Tato hodnota je způsobena umístěním senzoru na ruce, který je v této ose otočen právě o oněch  $60^\circ$ . V implementaci kódu je tak jednoduše ke každé



získané hodnotě v ose „z“ přičteno  $60^\circ$ , což zajistí požadovanou nulovou hodnotu při volně svěšené paži.

Vzorkovací frekvence byla nastavena na 20 Hz. Data jsou tedy snímána IMU senzorem každých 50 ms, odeslána přes I2C sběrnici do vývojové desky, kde dochází k jejich zpracování a následnému odeslání do počítače pomocí Bluetooth rozhraní v podobě funkce pro pohyb kurzoru. Při této vzorkovací frekvenci lze konstatovat pohyb myši za téměř plynulý a pro běžnou práci dostačující. Testovány byly i vyšší vzorkovací frekvence, které sice umožňovaly kontinuálnější pohyb myši (totožný s pohybem klasické myši k PC), avšak docházelo k výpadkům signálu, na jejichž straně stála neschopnost rychlosti přenosu dat přes Bluetooth rozhraní. Je nutné zmínit, že se spolu se zvyšující se vzdáleností uživatele od počítače (Bluetooth adaptéru) taktéž může zvýšit latence pohybu a pravděpodobnost výpadků signálu. Do vzdálenosti 10 m však zařízení při testování vždy fungovalo spolehlivě. Pro implementaci této funkce byla využita volně dostupná knihovna „BleMouse.h“ verze 0.3.1, která byla upravena pro potřeby zařízení [58]. Jednou z klíčových úprav bylo navýšení výkonu Bluetooth čipu v ESP32 ihned po jeho inicializaci, což zajišťuje vyšší dosah a sílu signálu při přenosu dat.



Obr. 35: Grafická vizualizace gesta pro pohyb myši

## Klik myši

Ke spuštění prezentace, představující ikonu na ploše nebo ve složce, je nutné zajistit také klik myši. Implementování této funkce se zdá být na první pohled poněkud složité. Celou situaci totiž komplikuje fakt, že jsou již využity dvě osy zastoupeny polohovými daty k pohybu myši. Jakékoliv gesto, při kterém by mělo dojít k většímu

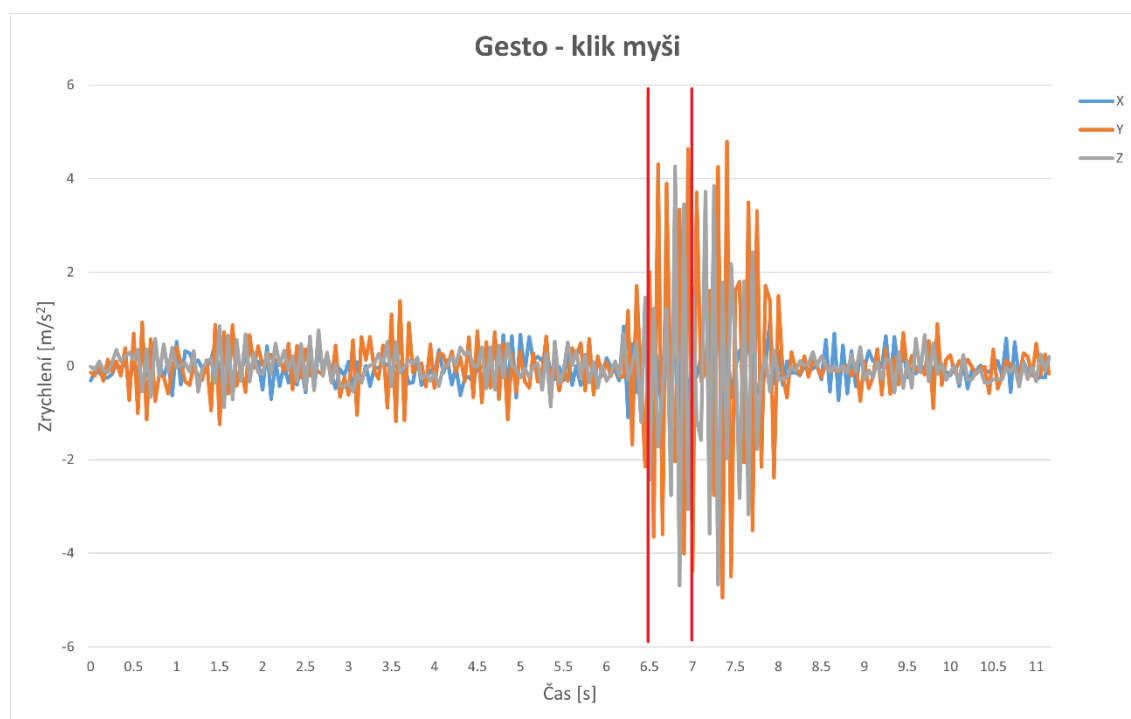
pohybu ruky nebo dlaně tedy nepřipadá v úvahu. Osou, která nemá na pohyb myši vliv je osa „x“, pod kterou je možné si v tomto případě představit rotaci volně svěšené dlaně. Klik myši by tedy mohl být jednoduše implementován pouhou rotací dlaně do daného úhlu a zpět. Taktéž bylo zváženo pouhé pozastavení myši, přičemž při setrvání kurzoru na jednom místě po předem určenou dobu (např. 2 s) by došlo ke kliknutí. Obě funkce však byly po testování zavrhnuty. Při rotaci dlaně by musely hodnoty náklonu senzoru v osách „y“ a „z“ po celou dobu rotace zůstat nulové (aby nedošlo k pohybu kurzoru myši), což se ukázalo jako téměř nemožné. V druhém případě by mohlo dojít k výpadku signálu a následnému nechtěnému kliknutí po jeho opětovném navázání. Jako nejlepší volbou se ukázalo využití akcelerometrických dat ve všech třech osách (Obr. 37). Průběh gesta je naznačen na Obr. 36.



Obr. 36: Znázornění gesta pro klik myši

Při využití akcelerometrických dat taktéž nesmí dojít k většímu vychýlení dlaně z důvodu následného pohybu myši, proto bylo navrženo gesto, při kterém dojde k jemnému zatřesení dlaně (paže) do všech stran. Ukázkou takového zatřesení je 11s signál na Obr. 37, na kterém je možné vidět průběh akcelerometrických dat ve všech třech osách, přičemž v 7. sekundě signálu dojde k požadovanému kliknutí (zatřesení dlaní). Jak již bylo naznačeno výše, je doporučeno provádět zatřesení celou paží, vycházející z ramenního kloubu. Nutno podotknout, že se jedná o lineární vektor akcelerace, který neuvažuje gravitaci zemského pole – proto by při uvážení senzoru v nehybné poloze byly pro tento vektor hodnoty ve všech třech osách

nulové. Na zbytku signálu je vyobrazen volný pohyb myši (dlaně). Je nutné si uvědomit, že na Obr. 37 jsou vyobrazena akcelerometrická data, tedy zrychlení senzoru v dané ose v závislosti na čase, a nezaměňovat tento typ dat s daty, které vyobrazují orientaci senzoru v prostoru, tedy náklon senzoru v dané ose v závislosti na čase (Obr. 35).

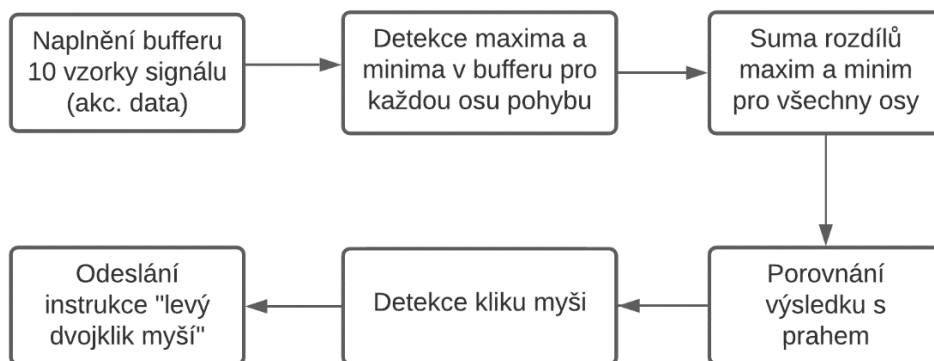


Obr. 37: Grafická vizualizace akcelerometrických dat gesta pro klik myši

Úsek detekované části signálu je na Obr. 37 vymezen svislými červenými čarami. Jedná se o 10 vzorků signálu vstupujících do bufferu, ve kterém budou analyzovány. V tomto úseku signálu bude vždy detekována maximální a minimální hodnota zrychlení v dané ose. Jak je patrné z Obr. 37, při volném pohybu dlaně rozdíl těchto dvou hodnot nepřesahuje 2 m/s<sup>2</sup>. Při zatřesení dlaní již rozdíl maxima a minima přesahuje hodnotu 8 m/s<sup>2</sup>. V tomto případě se jednalo pouze o jemné zatřesení. Při větším zatřesení dlaní je tato hodnota dvojnásobně vyšší. Pro zpřesnění detekce jsou v tomto případě využity všechny tři osy pohybu, ve kterých je spočítán rozdíl maximální a minimální hodnoty v bufferu. Tento rozdíl je pak sečten pro všechny tři osy. Zatímco při volném pohybu ruky osciluje tato hodnota kolem 5 m/s<sup>2</sup>, při zatřesení dlaní tato hodnota dosahuje až 50 m/s<sup>2</sup>. Experimentálně byl tedy určen práh zrychlení na základě vztahu (7), kterého je nutné dosáhnout pro detekci kliku myši. Tato hodnota byla nastavena na 35 m/s<sup>2</sup>.

$$p = \sum_{i=1}^{n=3} sMax_i - sMin_i, \quad (7)$$

kde „p“ je práh zrychlení a „sMax“ a „sMin“ jsou vzorky s maximální a minimální hodnotou zrychlení v bufferu pro danou osu, obsahujícím 10 vzorků signálu. Číslo „i“ v tomto případě zastupuje tři osy pohybu a nabývá tak hodnot jedna až tři (tedy „x“, „y“ a „z“). Blokové schéma detekce je znázorněno na Obr. 38.



Obr. 38: Blokové schéma detekce gesta pro klik myši

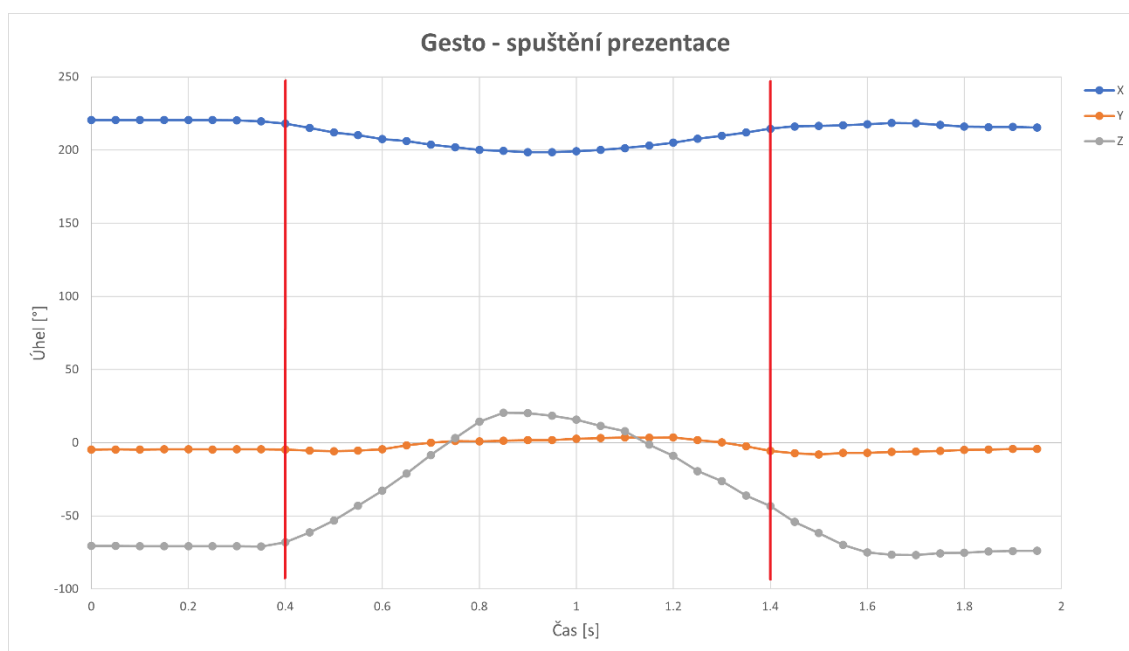
## Spuštění prezentace

Po otevření prezentace je nutnost zavedení gesta pro její spuštění. Samozřejmě by mohl uživatel jednoduše spustit prezentaci pomocí pohybu kurzoru myši a následného kliknutí na ikonu pro spuštění. Jednodušší variantou se však jeví zavedení samostatného gesta, které bude emulovat klávesu „F5“ – výchozí klávesa pro spuštění prezentace v programu PowerPoint. Gestem je jednoduché pozdvižení předloktí a následný návrat ruky do počáteční polohy volně svěšené dlaně (Obr. 39).



Obr. 39: Znázornění gesta pro spuštění prezentace

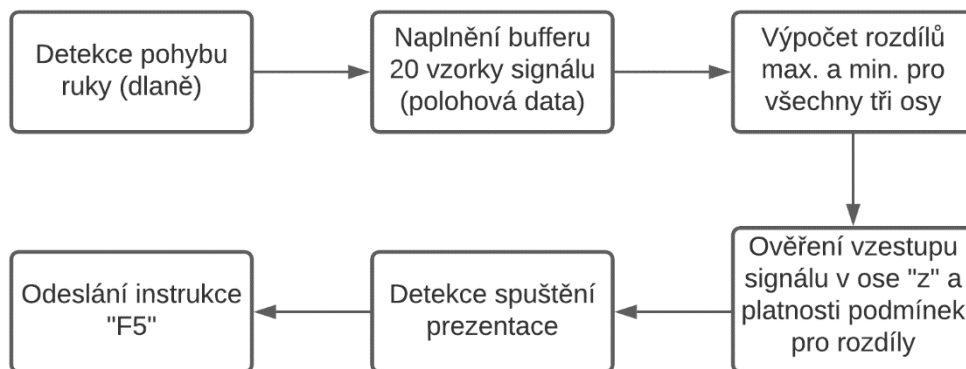
Grafickou vizualizaci gesta v podobě polohy senzoru v závislosti na čase je možné vidět na Obr. 40. Jak je z obrázku patrné, teoretické předpoklady pro průběh gesta byly splněny. Při pozdvižení předloktí totiž dochází k rotaci senzoru pouze v jedné ose, což také průběh polohy senzoru na obrázku potvrzuje. V čase 0,9 s došlo k maximálnímu vychýlení senzoru, při kterém paže a předloktí svírají úhel  $90^\circ$  (Obr. 39). Z obrázku je také vidět, že došlo k nepatrnému vychýlení senzoru v ose „x“, na což je při detekci gesta také nutné myslet.



Obr. 40: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro spuštění prezentace

Pro detekci spuštění prezentace je tedy klíčová – jak naznačuje vývojový diagram programu – detekce pohybu ruky, která je na Obr. 40 zahájena v čase 0,4 s. Dle teoretických předpokladů lze v tomto případě vycházet z faktu, že hodnoty pro osy „x“ a „y“ se drží v jasně daných pásmech. Samotnou detekci gesta tedy představuje udržení hodnot pro osu „x“ a „y“ v experimentálně určeném pásmu. Dle Obr. 40 by nemělo v těchto dvou osách dojít k výchylkám polohy větším než 20°. Hodnoty pro tato pásma lze jednoduše vypočítat jako rozdíl maximální a minimální hodnoty signálu v bufferu pro danou osu. Díky testování zařízení na jiných osobách byly tyto hodnoty stanoveny na 30° pro osu „x“ a 25° pro osu „y“. V ose „z“ je pak klíčové detekovat pozdvižení předloktí, které představuje vychýlení senzoru o zhruba 90° (v čase 0,4 s – 0,9 s na Obr. 40). Tento příznak je programově ošetřen na základě vzestupné tendence a dále je pojištěn ověřením rozdílu maximální a minimální hodnoty v bufferu, která pro osu „z“ musí u tohoto gesta dosáhnout minimálně 70°. Shora toto pásmo není nijak omezeno, protože u některých uživatelů docházelo přirozeně při pohybu k vychýlení předloktí o více než 90°, což mělo za příčinu zhoršení senzitivity při detekci tohoto gesta. Blokové schéma detekce je možné vidět na Obr. 41.

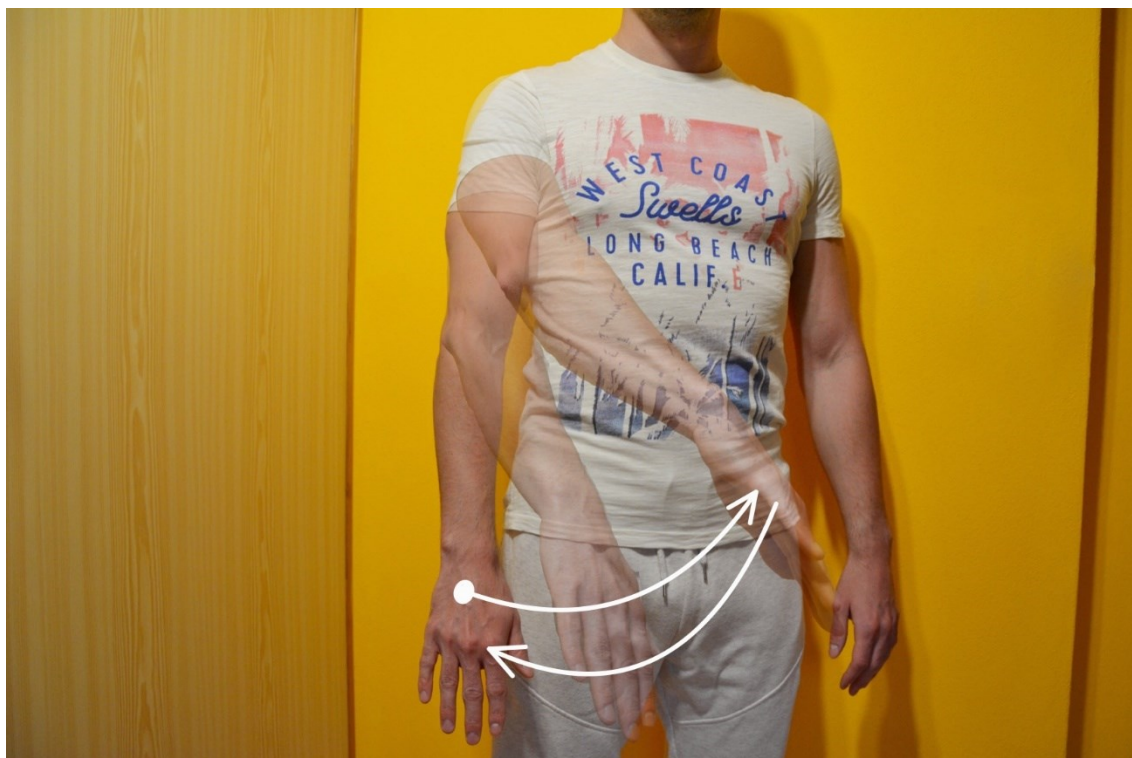




Obr. 41: Blokové schéma detekce gesta pro spuštění prezentace

### Posun prezentace vpřed

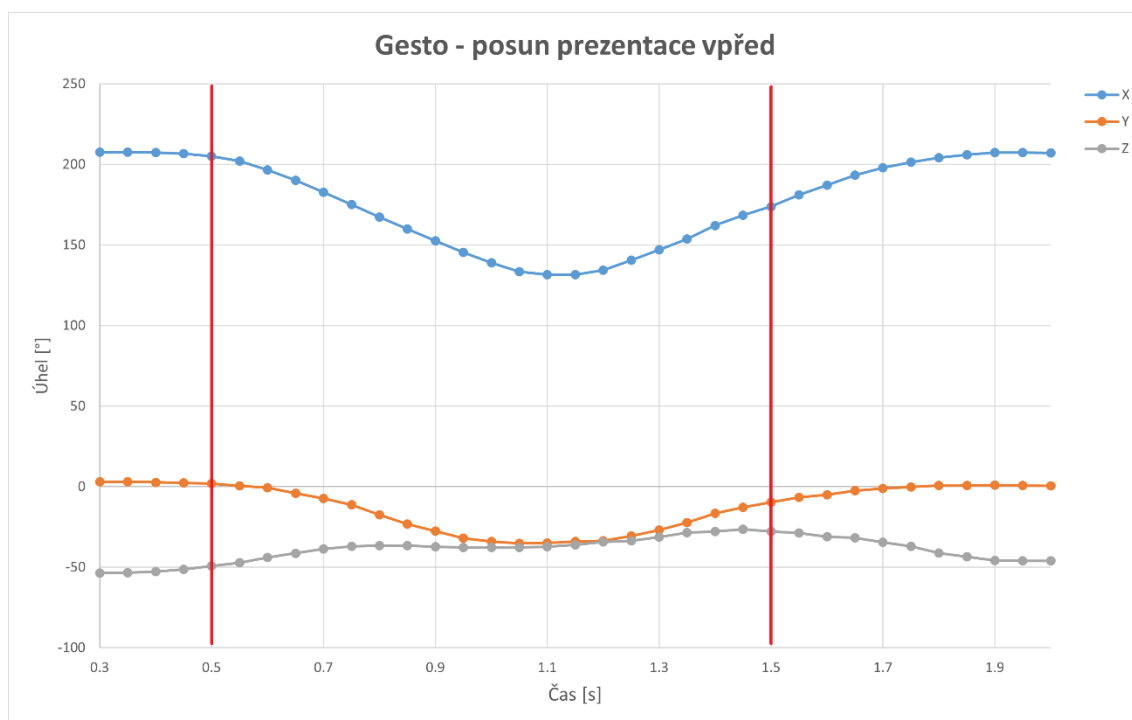
Klíčovou funkcí zařízení je posun prezentace vpřed, méně důležitou pak posun prezentace vzad. Pro posun prezentace vpřed bylo navrženo intuitivní gesto, které je možné vidět na Obr. 42. Uživatel jednoduše vychýlí dlaň z počáteční polohy před tělo a následuje její návrat do výchozí polohy. Je nutné si dát v průběhu pohybu pozor na zafixovanou dlaň a nijak s ní nehýbat a nerotovat.



Obr. 42: Znázornění gesta pro posun prezentace vpřed

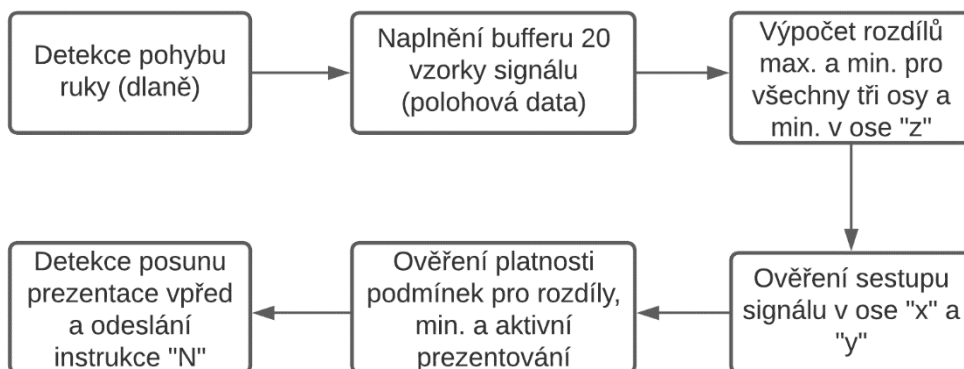
Grafickou vizualizaci gesta lze vidět na Obr. 43. Opět je nejdříve nutné detekovat pohyb ruky na základě akcelerometrických dat, který v grafu na Obr. 43 představuje signál v čase od 0,5 s. Samotná detekce tohoto gesta je opět založena na udržení

hodnot pro všechny osy pohybu v daných pásmech, vzestupné nebo sestupné tendenci signálu a také na minimální hodnotě v bufferu pro osu „z“.



Obr. 43: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro posun prezentace vpřed

V tomto konkrétním případě je nutné udržet pásmo osy „x“ ve výchylce od 50° do 100° a pásmo osy „y“ od 0° do 50°. Minimální hodnota v bufferu pro osu „z“ musí být větší než -110° a menší než -30°. Dále je ověřena sestupná tendence signálu v osách „x“ a „y“ v počátku pohybu, a nakonec také to, jestli je spuštěno prezentování. Bez předchozí emulace klávesy „F5“ tak není možné toto gesto vyvolat. Instrukce pro gesto pro posun prezentace vpřed náleží klávese „N“ (next). Blokové schéma detekce je znázorněno na Obr. 44.

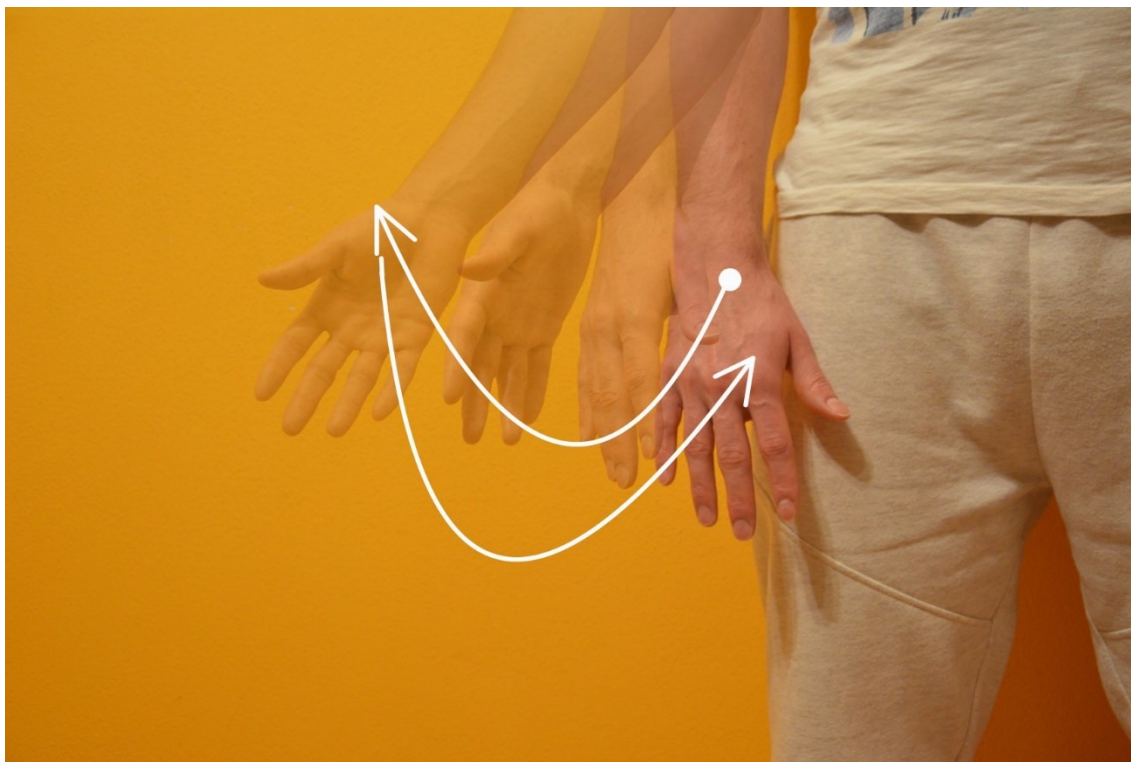


Obr. 44: Blokové schéma detekce gesta pro posun prezentace vpřed



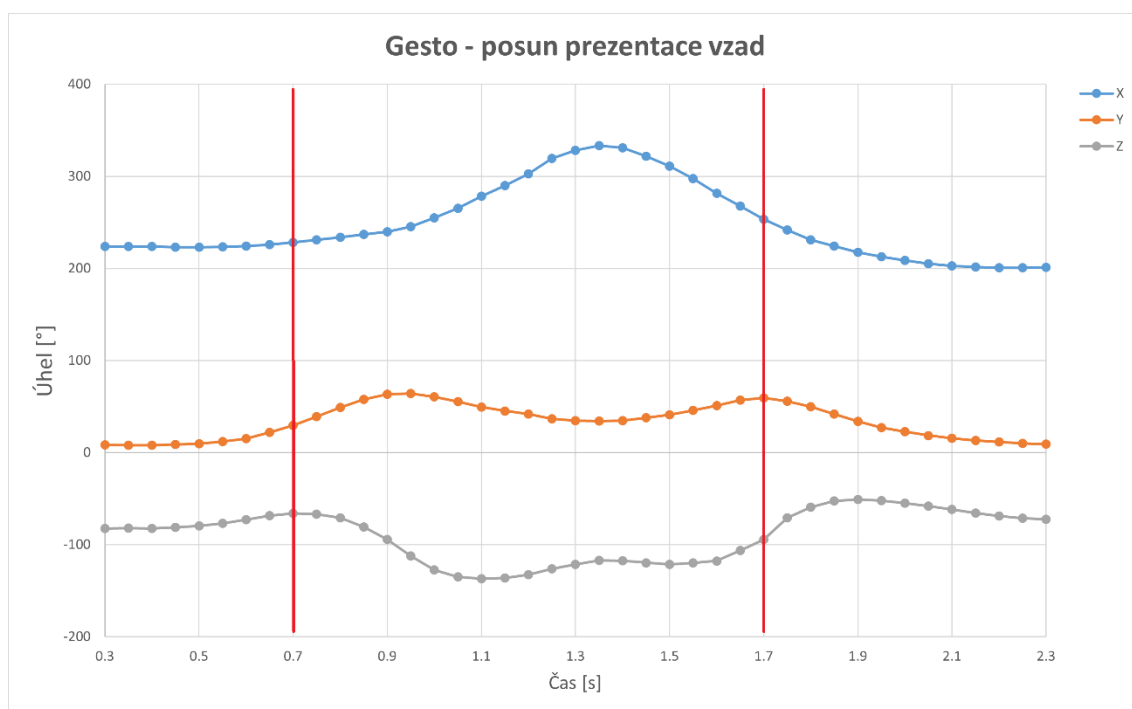
## Posun prezentace vzad

Pro posun prezentace vzad bylo navrženo gesto (Obr. 45), při kterém uživatel po obloukové trajektorii vychýlí dlaň z výchozí polohy (rotací až o  $180^\circ$ ) a následně ji vrátí zpět. Opět se jedná o intuitivní pohyb rukou, který lze přirovnat např. k listování v knize o stranu zpět.



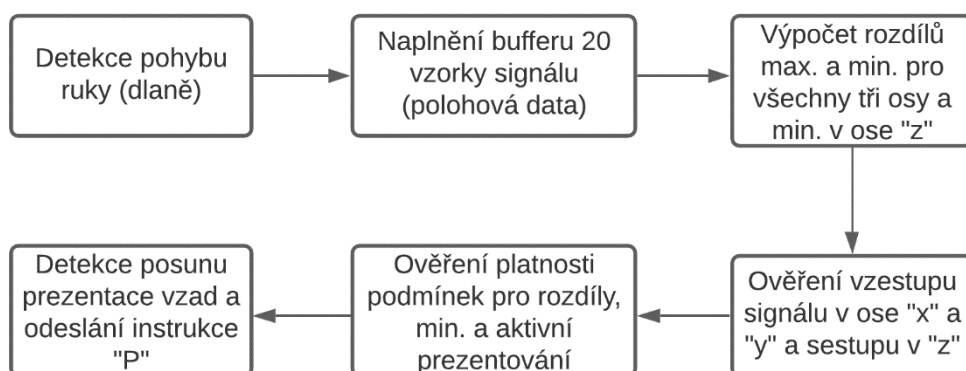
Obr. 45: Znázornění gesta pro posun prezentace vzad

Na Obr. 46 je možné vidět průběh polohových dat senzoru pro toto gesto. Z obrázku je patrná předpokládaná rotace v ose „x“, u které je možné pozorovat maximální rozdíl vychýlení zhruba  $120^\circ$ . To je však o  $60^\circ$  méně, než bychom podle názorné ukázky gesta na Obr. 45 očekávali. Tento rozdíl je způsoben natočením dlaně v počátku pohybu (1. fáze) a nedokonalé rotaci ve 4. fázi pohybu dle Obr. 45. Pro detekci však bude v této ose postačovat z důvodu natočení dlaně uživatele vychýlení senzoru o více než  $100^\circ$ . V ose „y“ je možné vidět v čase 0,9 s a 1,7 s dva peaky následující za sebou v kladné výchylce o zhruba  $60^\circ$ , kterých by mohlo být u detekce gesta v této ose využito. V ose „z“ lze také pozorovat dva peaky, tentokrát ve výchylce záporné (čas 1,1 s a 1,5 s). Ani jeden z těchto peaků však není natolik výrazný, aby s nimi mohla spolehlivá detekce počítat. Co je však v tomto případě dostačující a přesvědčivé, jsou vzestupné a sestupné tendence ve všech třech osách pohybu.



Obr. 46: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro posun prezentace vzad

Jak již bylo řečeno výše, u detekce gesta pro posun prezentace vzad bude využito polohových dat ze všech třech os. V ose „x“ bude detekováno vychýlení senzoru alespoň o  $100^\circ$ , maximálně však o  $180^\circ$ . V průběhu osy „y“ bude detekována taktéž kladná výchylka, a to o minimálně  $15^\circ$ , maximálně však o  $65^\circ$ . V ose „z“ pak bude ověřeno, zda-li je minimální hodnota v bufferu menší než  $-90^\circ$ . Jak již bylo zmíněno výše, ověřeny jsou také tendence signálu v první půli bufferu. V ose „x“ a „y“ se jedná o vzestup signálu, v ose „z“ pak o sestup. Nakonec je program dotázán, jestli je aktivní prezentování. Bez předchozí emulace klávesy „F5“ tak není možné toto gesto vyvolat, stejně jako je tomu v případě předchozího gesta pro detekci posunu prezentace vpřed. Instrukce pro gesto pro posun prezentace vzad náleží klávese „P“ (previous). Blokové schéma detekce je možné vidět na Obr. 47.



Obr. 47: Blokové schéma detekce gesta pro posun prezentace vzad

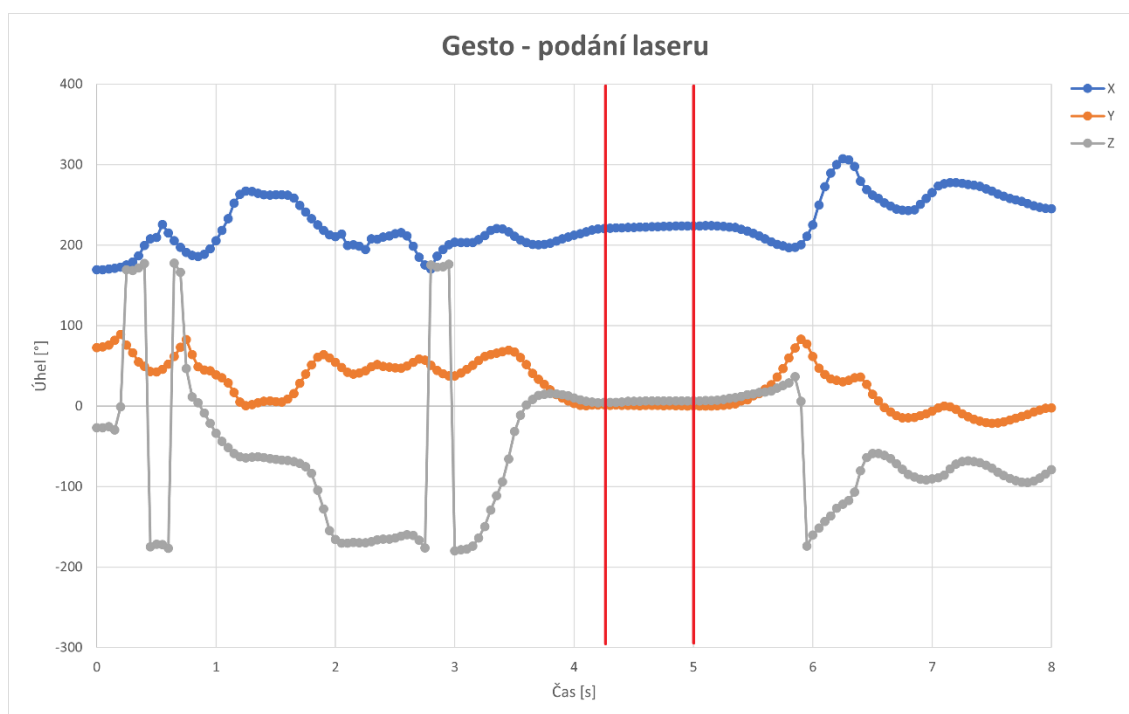
## Aktivace/deaktivace laserového ukazovátka

Hojně používanou funkcí při prezentování je laserové ukazovátko. Implementace této funkcionality je již složitější, protože je nutné programově zkontrolovat, jestli probíhá prezentování, použít dvojklávesovou zkratku (v případě předchozích gest se jednalo pouze o stisk jedné klávesy) a v neposlední řadě po zobrazení laseru opět aktivovat a umožnit pohyb myši. S aktivním laserem by také mělo být možné prezentací nadále listovat a přepínat jednotlivé slidy, popř. ji i ukončit. Další překážkou v cestě je fakt, že jsou již využity pohyby do tří stran pro tři jiná gesta. Nejdříve bylo pro tuto funkci uvažováno dynamické gesto, kdy by uživatel předpažil ruku a poté ji s rotací dlaně přitáhl k hrudi. I když to mi – jakožto vývojáři tohoto zařízení – tento typ pohybu dařil, u jiných uživatelů při testování na prototypu zařízení tento typ pohybu přinášel spíše negativní výsledky a úspěšnost detekce u tohoto gesta dosahovala pouhých 50 %. Tento pohyb byl tak zavržen a namísto bylo toto gesto naprogramováno jako statické – není tedy nutné vykonávat žádný pohyb, pouze se ruka ustálí v dané pozici. Pro detekci je tedy využito jak akcelerometrických, tak polohových dat senzoru. Znázornění gesta je možné vidět na Obr. 48.

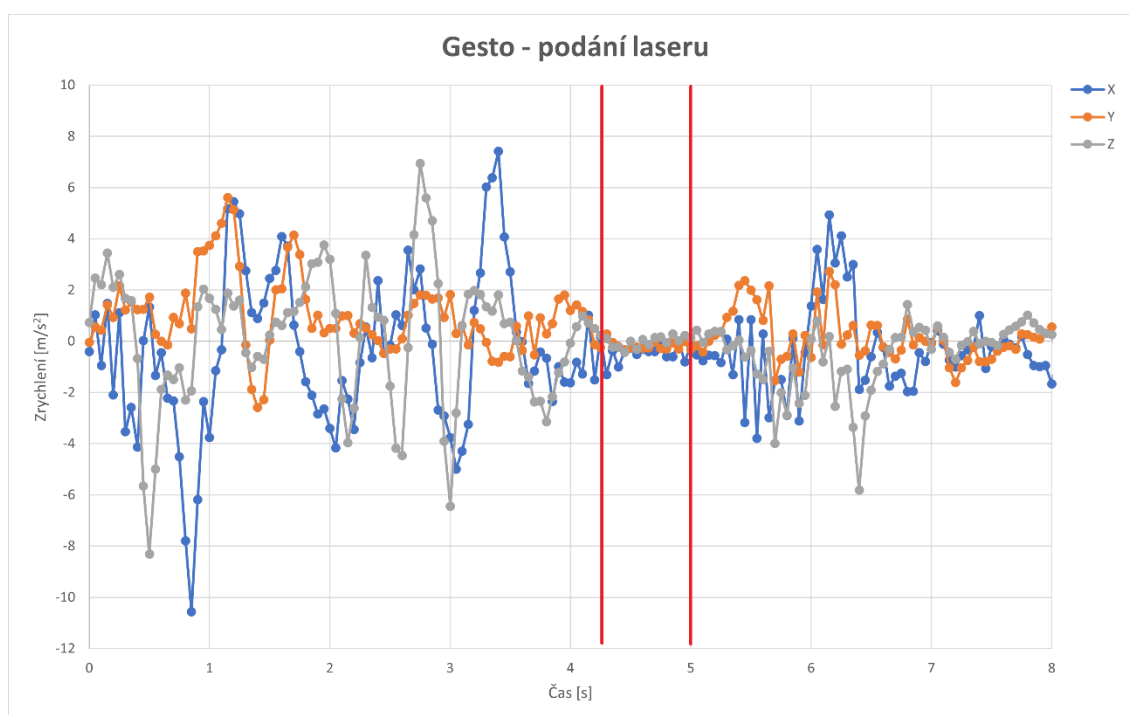


Obr. 48: Znázornění gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka

Průběh polohových dat je možné vidět na Obr. 49, průběh dat akcelerometrických pak na Obr. 50. V obou případech je červenými čarami vyznačen úsek signálu, pro který jsou splněny všechny podmínky úspěšné detekce gesta.



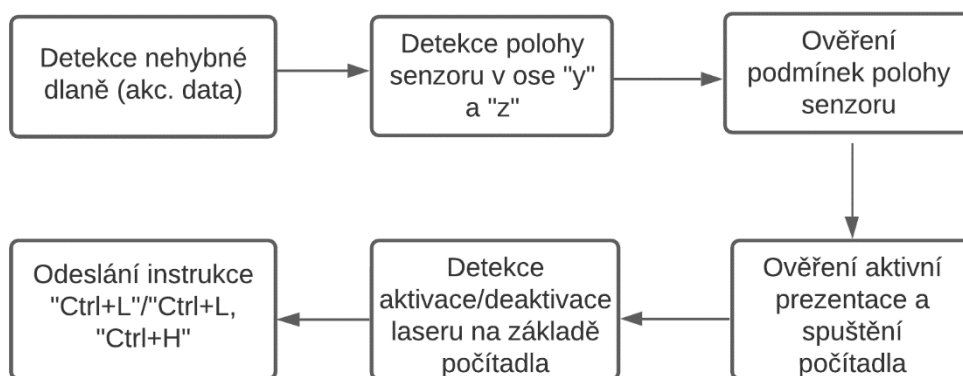
Obr. 49: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka



Obr. 50: Grafická vizualizace akcelerometrických dat gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka

Orientace senzoru v ose „z“ musí nabývat hodnot od min.  $-25^\circ$  do max.  $20^\circ$ . Orientace v ose „y“ pak rozmezí  $-25^\circ$  až  $25^\circ$ . Tato data odpovídají předpažené ruce (Obr. 48). Suma rozdílů max. a min. hodnot lineárního vektoru akcelerace pro

všechny tři osy pohybu pak nesmí překročit hodnotu  $3 \text{ m/s}^2$  (vztah (7) u gesta pro detekci kliku myši). Další podmínkou je spuštěná prezentace. Při splnění těchto podmínek se v programu zapne kumulativní počítadlo, které musí pro odeslání instrukce k aktivaci laserového ukazovátka nabývat hodnoty 15. Při vzorkovací frekvenci 20 Hz to odpovídá časovému úseku 750 ms, přičemž po celou tuto dobu musí být výše uvedené podmínky splněny, jinak dojde k restartování počítadla. V reálu tedy stačí předpažit ruku na necelou sekundu a nehýbat s ní. Těmito podmínkami je zaopatřena jak aktivace laseru, tak jeho deaktivace. Problémem v programu PowerPoint při zahazení laseru je to, že zůstane na obrazovce aktivní kurzor myši. V případě aktivace laseru je tak odeslána počítači pouze instrukce v podobě stisku kláves „Ctrl+L“. V případě deaktivace je však nutné za touto instrukcí odeslat ještě instrukci „Ctrl+H“, která po deaktivaci laseru ještě deaktivuje kurzor myši na obrazovce. Vzhledem k tomu, že se jedná o dvě rozdílné instrukce z pohledu emulace klávesnice, je nutné ještě program zaopatřit detekcí aktivovaného, popř. deaktivovaného ukazovátka. Tato detekce je zajištěna proměnnou typu „boolean“ nabývající hodnot „True“ (v případě aktivního laseru) nebo „False“ (v případě laseru neaktivního). Blokové schéma detekce je možné vidět na Obr. 51.



Obr. 51: Blokové schéma detekce gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka

### Zavření (ukončení) prezentace

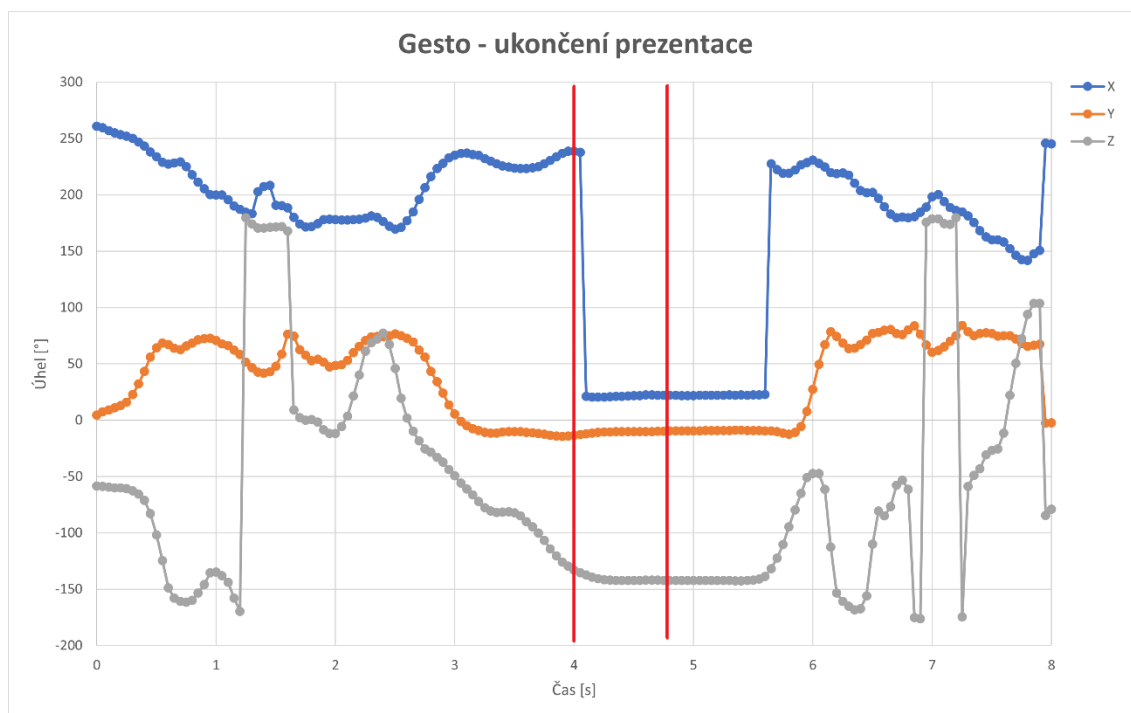
Na závěr prezentování je jako bonusová funkce zařízení implementováno také ukončení prezentace, po kterém se zařízení uživatelsky vrátí do stavu jako před počátkem prezentace – je tedy možné volně pohybovat s kurzorem myši a provádět kliknutí, popř. opět spustit prezentaci. Toto gesto je z podobných důvodů jako předchozí (aktivace/deaktivace laserového ukazovátka) implementováno jako statické. Gesto využívá jak akcelerometrických, tak polohových dat a opět je tedy nutné podržet po dobu 750 ms ruku v předem dané pozici (Obr. 52).



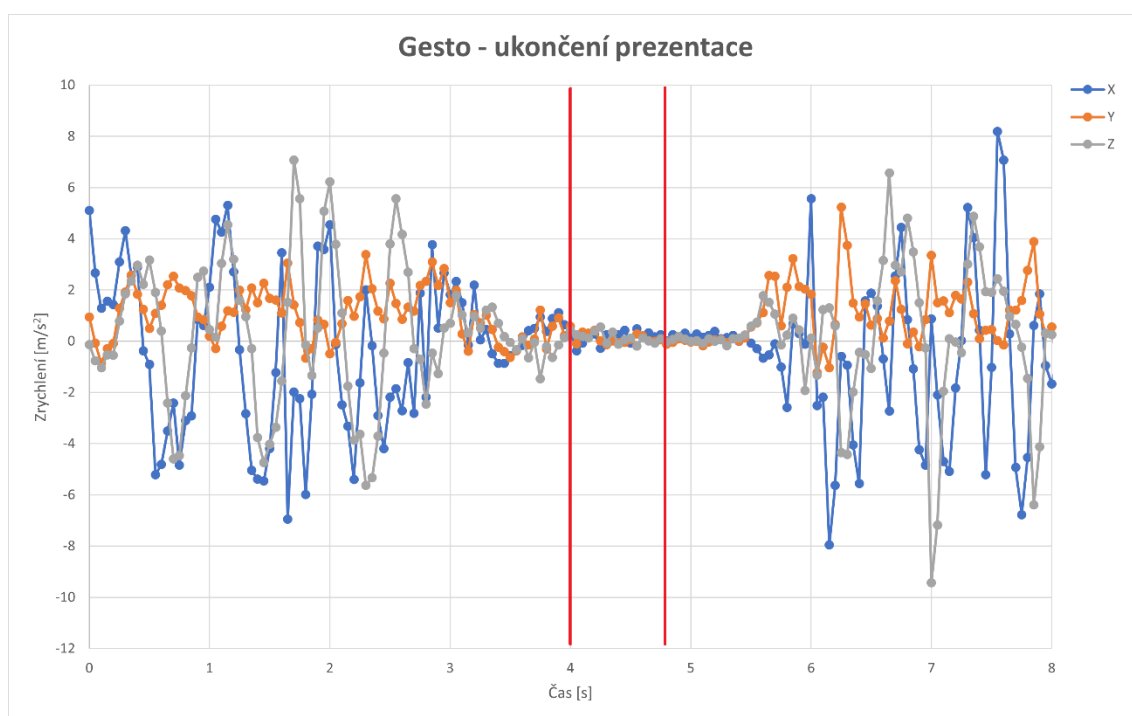


Obr. 52: Znáznornění gesta pro ukončení prezentace

Průběh polohových dat je možné vidět na Obr. 53, průběh dat akcelerometrických pak na Obr. 54. V obou případech je červenými čarami vyznačen úsek signálu, pro který jsou splněny všechny podmínky úspěšné detekce gesta.

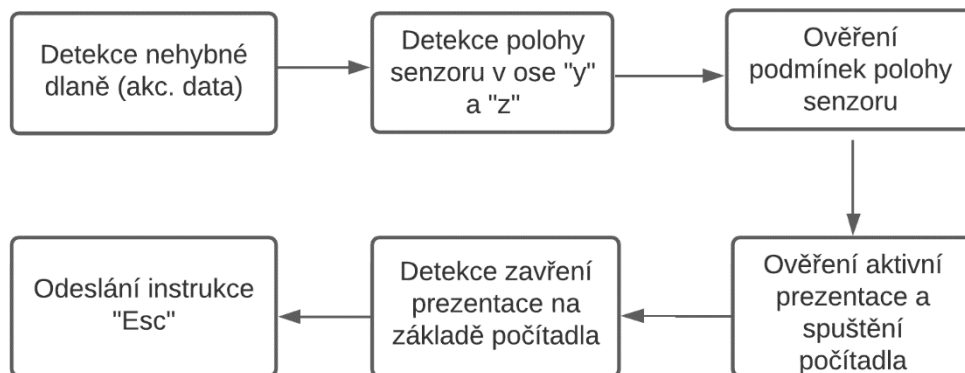


Obr. 53: Grafická vizualizace polohových dat gesta pro ukončení prezentace



Obr. 54: Grafická vizualizace akcelerometrických dat gesta pro ukončení prezentace

Jak již bylo zmíněno, toto gesto je založeno na stejném principu jako gesto předchozí. V tomto případě se však nejedná o předpaženou ruku, nýbrž o dlaň vytočenou za dozadu (za tělo) při volně svěřené paži podél těla. Detekce je umožněna na základě polohových dat ze dvou os – „y“ a „z“. V případě osy „y“ je nutné ruku držet v úhlu natočení od  $-30^\circ$  do  $10^\circ$ , v případě osy „z“ pak od  $-110^\circ$  do  $-150^\circ$ . Suma rozdílů max. a min. hodnot lineárního vektoru akcelerace pro všechny tři osy pohybu nesmí překročit hodnotu  $3 \text{ m/s}^2$  a opět je nutné – logicky – splnit podmínku aktivního prezentování. Jak je patrné z Obr. 53 a Obr. 54, všechny podmínky detekce z hlediska dat jsou splněny dvakrát za sebou, avšak po prvním odeslání instrukce se již proměnná typu „boolean“ zajišťující sledování chodu prezentace přepne na „False“ a podruhé již nedojde k odeslání instrukce pro ukončení prezentace. Instrukce je emulována stiskem klávesy „Esc“. Blokové schéma je možné vidět na Obr. 55.



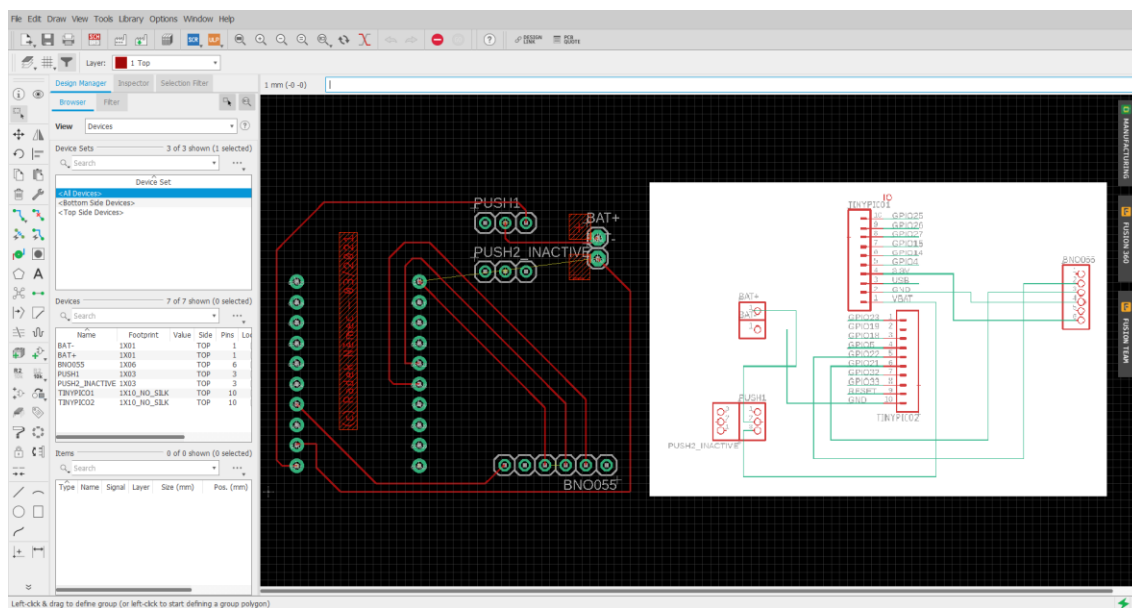
Obr. 55: Blokové schéma detekce gesta pro ukončení prezentace

### 4.3 Realizace zařízení

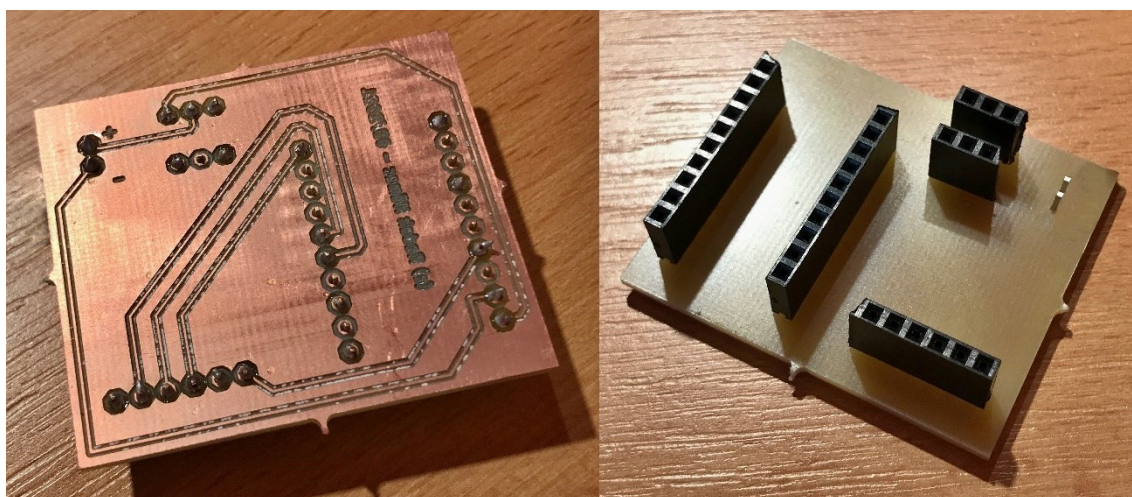
Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách a na Obr. 32, cílem této práce je vyřešit konstrukční řešení, aby komponenty byly vhodně udrženy v celku i přes pohyb ruky. Zařízení by mělo být pro uživatele pohodlné, nemělo by na ruce překážet a s rukou by měl být uživatel vykonávat jakékoliv další činnosti (např. uchopit do ruky tužku a psát s ní). Dalšími aspekty při návrhu byly také celková minimalizace zařízení z hlediska jeho rozměrů a taktéž jeho váha.

Prvním krokem bylo vyřešit vzájemné uspořádání komponent a jejich propojení na základě schématu z Obr. 31. Komponenty by mohly být jednoduše propojeny měděnými drátky, které by se napájely na jednotlivé piny na zařízeních, popř. spínači a baterii. Takto propojené komponenty by se pak jednoduše umístily do jakési rukavice, která by se navlekla na ruku. Taková zařízení jsou v této práci již popsána v kap. 2.3. V případě jakékoliv poruchy jedné z komponent by však následná oprava byla velmi složitá a namáhavá. Bylo tedy nutné navrhnout řešení, díky kterému bude možné v případě jakéhokoliv problému jednotlivé komponenty jednoduše odpojit a nahradit novými. V tomto případě se nabízí využít klasického nepájivého pole, do kterého by se komponenty jednoduše zastrčili a propojili pomocí drátků. Nepájivé pole je však poměrně vysoké a propojování drátky se nejeví v případě takového zařízení jako schůdné. Nejlepším možným řešením se tak jeví využití desky tištěných spojů (anglicky PCB deska, neboli Printed Circuit Board, česky pak DPS deska), která bude navržena přímo na míru jednotlivých komponent. Na tuto desku se pak napájí dutinky, do kterých se jednotlivé komponenty pouze zacvaknou. Deska pro tuto práci byla navržena v programu Autodesk Eagle dle schématu z Obr. 31. Ukázkou prostředí tohoto programu je možné vidět na Obr. 56. Hotová vyfrézovaná deska je pak i s napájenými dutinkami z obou stran na Obr. 57.



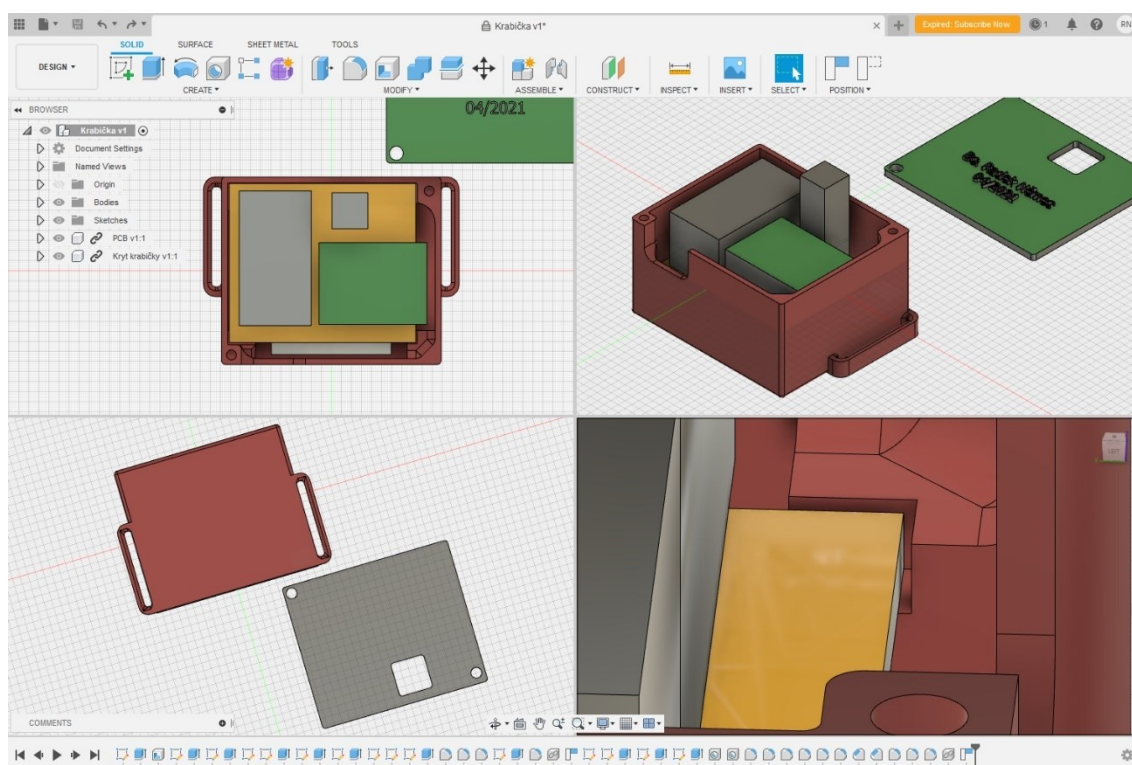


Obr. 56: Ukázka prostředí programu Autodesk Eagle



Obr. 57: Deska tištěných spojů s napájenými dutinkami

Dalším krokem bylo po umístění komponent na desku navržení obalu, do kterého se tato deska společně s baterií umístí. V tomto případě se jako jednoduchá volba – po vzoru v této práci již popsanych publikací – jeví umístění desky na rukavici. Vzhledem k tomu, že by rukavice byla pouze jedné velikosti, nemusela by tak sedět každému uživateli, proto si tato práce dala za cíl navržení vlastního řešení. Tím bylo navržení obalu z lehkého PLA materiálu, který bude následně vytištěn na 3D tiskárně. Celý model obalu byl vymodelován v programu Autodesk Fusion360 a následně vytištěn na 3D tiskárně. Ukázku obalu i s jednotlivými komponenty z prostředí tohoto programu je možné vidět na Obr. 58.

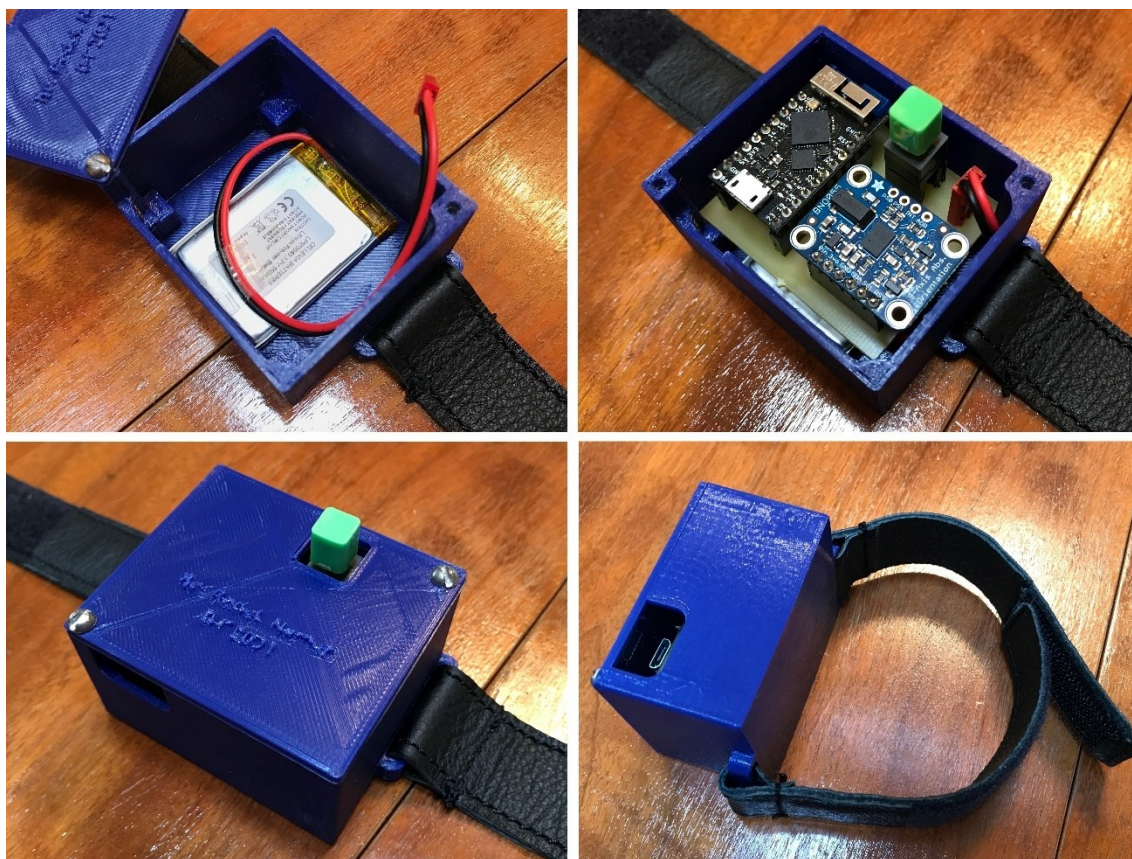


Obr. 58: Ukázka prostředí programu Autodesk Fusion360

Tento obal se skládá z krabičky a krytu, který je ke krabičce přišroubován dvěma šroubky. Po stranách obalu jsou pak dvě ouška, na která je navlečen kožený pásek, díky kterému je možné zařízení přichytit na ruku. Tato ouška jsou schválně umístěna na kraji krabičky, a to z důvodu jejího následného uchycení na ruku (Obr. 60). Pokud by ouška byla přímo uprostřed krabičky, krabička by pak zasahovala do kloubů ruky uživatele, což by při ohybu prstů nebylo uživatelsky příjemné. Na spodek krabičky je vložena baterie, která je ke krabičce – po vzoru dnešních výrobců mobilních telefonů – přichycena oboustrannou lepicí páskou. Kousek baterie lze vidět na Obr. 58 vlevo nahoře, kde je obarvena bílou barvou. V rozích krabičky jsou pak centimetrové výstupky, do kterých je zacvaknuta deska tištěných spojů. Detail jednoho z výstupků je možné vidět na Obr. 58 vpravo dole. V krabičce je také vymodelován otvor na microUSB port mikrokontroléru, díky kterému je možné jak nabíjet baterii, tak nahrát do mikrokontroléru nový software bez toho, aniž by bylo nutné otvírat krabičku a vyjímat ho z dutinek. Právě po vyjmutí z dutinek by pak bylo nabíjení baterie možné pouze po následném propojení mikrokontroléru a dutinek drátky, což je opět komplikované a uživatelsky velmi nepřívětivé. Do krytu krabičky je pak vymodelován čtvercový otvor na spínač. Na spínač B1702A, který je v této práci použit je nasazen zelený hmatník (Obr. 59 vpravo nahoře a vlevo dole) o rozměrech 7x7 mm pro spínače typu P1, díky kterému je stisk tlačítka pohodlnější. Na závěr bylo nutné navrhnout a na míru vyrobit pásek, který bude uchycen na ouška krabičky. Tento pásek byl ušit z koženého materiálu, který se pro



dlouhodobější používání na ruce jeví jako dostatečně pohodlný. Na koncích pásku je našitý suchý zip, který se k sobě po umístění na ruku přichytne. Ukázku kompletace zařízení a reálných komponent je možné vidět na fotkách na Obr. 59.



Obr. 59: Ukázka kompletace a finální verze zařízení

Všechny komponenty se podařilo vměstnat do krabičky o rozměrech 32x55x46 mm (výška x šířka x hloubka, bez oušek a hmatníku). Zelený hmatník z krabičky vyčnívá o 8 mm. Každé z oušek z krabičky přesahuje o 5 mm. Celkové rozměry zařízení jsou tedy 40x60x46 mm (výška x šířka x hloubka, s oušky a hmatníkem). Délka obou pásků je 11 cm (samostatně). Krabičku tak lze upnout na dlaň o obvodu max. 26 cm. Vzhledem k tomu, že suchý zip na páscích je umístěn pouze na jejich okraje, obvod dlaně je omezen na min. 18 cm. Celková váha zařízení pak činí přesně 60 g. Pro srovnání, váha hodinek Apple Watch 3. série s úhlopříčkou displeje 42 mm činí i s gumovým sportovním páskem 66 g. Jak zařízení, tak hodinky byly vlastnoručně zváženy na kuchyňské váze ETA Dori 6778.

## 4.4 Dokumentace

Používání zařízení je pro klasického uživatele velmi jednoduché a intuitivní. Nejdříve je zařízení uchyceno na ruku uživatele. Zařízení musí být uchyceno tak, aby zelený hmatník tlačítka byl z pohledu uživatele na spodu krabičky. Delší hrany krabičky by pro zajištění správné funkčnosti měly svírat s osou paže úhel 90°. Odchyłky v řádech stupňů jsou samozřejmě tolerovány. Správné uchycení zařízení na ruku je znázorněno na Obr. 60.

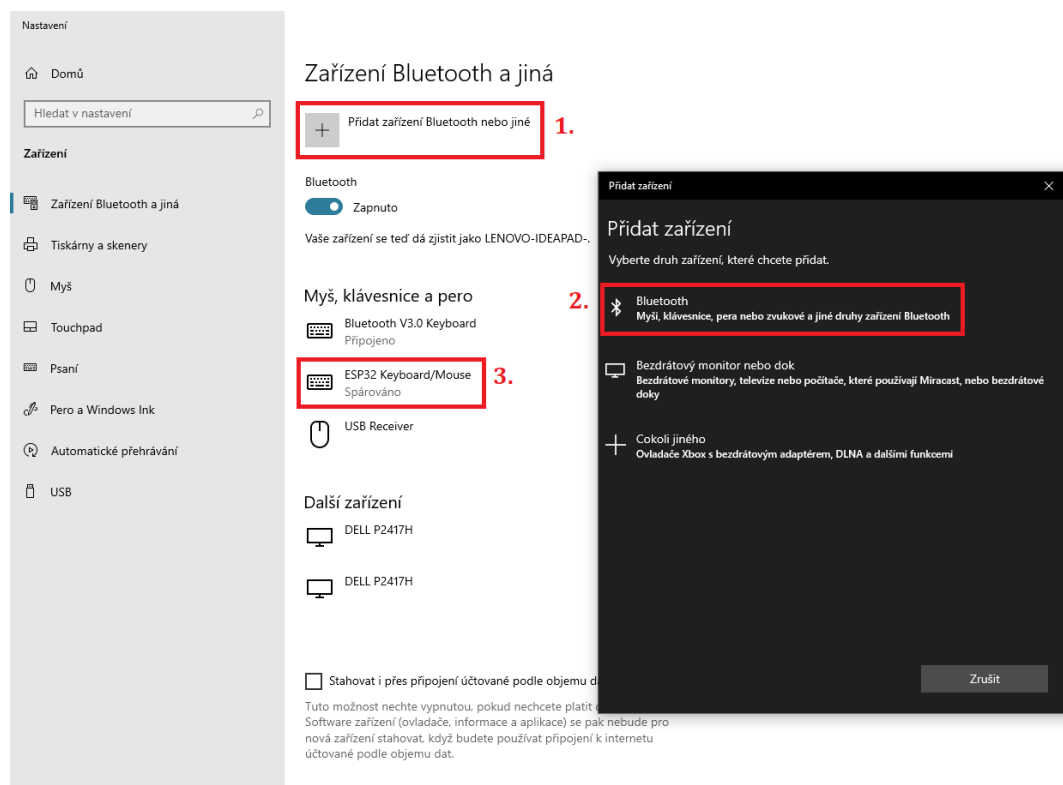
Zařízení je navrženo pro uchycení na pravou ruku. V případě uchycení na levou ruku není zajištěna veškerá funkčnost zařízení (na levé ruce fungují dle obrázků gesta pouze následující gesta: pohyb myši, klik myši, spuštění prezentace, aktivace/deaktivace laserového ukazovátka, zavření prezentace). V případě gesta pro posun prezentace vpřed byla funkčnost testována a je do jisté míry také zajištěna, gesto však musí být provedeno v souladu s jeho požadavky (Obr. 42). Pro gesto pro posun prezentace vzad je již funkčnost na levé ruce velmi špatně dosažitelná (není však nemožná).



Obr. 60: Správné uchycení zařízení na ruku

Po uchycení zařízení na ruku uživatel stiskne spínač zařízení (zelený hmatník), čímž zařízení uvede do provozu Bluetooth modul na mikrokontroléru. Následně je nutné otevřít v systému počítače, tabletu, mobilu nebo jiného zařízení nastavení Bluetooth a připojit zařízení k počítači. Ukázkou připojení zařízení

v systému Windows 10 je možné vidět názorně na Obr. 61. Po otevření „Zařízení Bluetooth a jiná“ uživatel klikne na „Přidat zařízení Bluetooth nebo jiné“. Následně v dialogovém okně vybere možnost „Bluetooth myši, klávesnice, pera nebo zvukové a jiné druhy zařízení Bluetooth“. Následně vyskočí okno, ve kterém už stačí kliknout na „ESP32 Keyboard/Mouse“ a zařízení se během pár sekund připojí. Ihned po připojení zařízení se aktivuje ovládání kurzoru myši. V ojedinělých případech se může stát, že chvíli trvá, než se zkalibruje IMU senzor a kurzor myši se hýbe i při volně svěšené paži. Toto chování však trvá maximálně 5 sekund, než se senzor zkalibruje. Za normálních okolností a volně svěšené paži uživatele však ihned po připojení zařízení kurzor myši zůstane stát, popř. se hýbe s velmi malým krokem. Dále je již možné aplikovat jednotlivá gesta, tak jak byla popsána a vyobrazena v kap. 4.2 na Obr. 39, Obr. 42, Obr. 45, Obr. 48 a Obr. 52. Jak je možné vidět na Obr. 61, u zařízení „ESP32 Keyboard/Mouse“ je zobrazeno „Spárováno“. V tomto případě zařízení není připojeno k počítači, je pouze pro počítač známé. V případě úspěšně připojeného zařízení je u „ESP32 Keyboard/Mouse“ zobrazeno „Připojeno“, tak jak je tomu na Obr. 61 u zařízení „Bluetooth V3.0 Keyboard“. Pokud již bylo jednou navázáno spojení systému se zařízením a zařízení následně nebylo ze systému odebráno, není nutné při opakovaném připojení zařízení provádět opět stejný postup. Zařízení se po jeho aktivaci zeleným hmatníkem (tlačítkem) během pár sekund připojí ke známému systému, jeho stav se změní ze „Spárováno“ na „Připojeno“ a bez prodlevy začne fungovat.



Obr. 61: Připojení zařízení v systému Windows 10

Při reálném používání zařízení byl naměřen průměrný odběr proudu 75 mA. Jak již bylo zmíněno v kap. 4.1, kapacita použité baterie je 550 mAh. Dosazením těchto hodnot do vztahu (8) lze zjistit, jak dlouho je možné zařízení používat na jedno plné nabití baterie. Tento předpoklad je však pouze teoretický a závisí na řadě dalších faktorů (např. stáří baterie). Z níže uvedeného vztahu (8) pak vyplývá teoretická výdrž baterie 7 hod. a 20 min.

$$\text{Výdrž baterie [h]} = \frac{\text{Kapacita baterie [mAh]}}{\text{Odběr proudu [mA]}}. \quad (8)$$

V kap. 4.1 bylo také zmíněno, že se dá zařízení nabíjet díky navrženému obvodu přes TinyPICO. Nabíjení probíhá pomocí USB kabelu přes microUSB port TinyPICO. Kabel lze připojit např. k USB portu počítače. Datasheet výrobce mikrokontroléru je sice v tuto chvíli velmi limitovaný, ale i přesto se podařilo sehnat základní informace o integrovaném nabíjecím obvodu. Nabíjecí proud je fixován na 330 mA [45]. Výrobce Li-Pol baterie zmiňuje maximální nabíjecí proud roven 1 C. Při kapacitě baterie 550 mAh tato hodnota odpovídá maximálnímu nabíjecímu proudu 550 mA. Ze vzorce v níže uvedeném vztahu (9) si lze jednoduše vypočítat dobu nabíjení baterie, která odpovídá (při nabíjecím proudu 0,6 C) zhruba 1 hod. a 40 min.

$$\text{Nabíjení baterie [h]} = \frac{\text{Kapacita baterie [mAh]}}{\text{Nabíjecí proud [mA]}}. \quad (9)$$

Baterie použitá v této práci nemá dle specifikace výrobce integrovaný ochranný obvod proti podbití baterie [59]. Pokud by došlo k úplnému vybití baterie, tak je možné, že již některé z článků baterie nepůjde plně nabít. Tyto změny jsou nevratné. Rovněž tato baterie nemá ochranu proti přebití. V tomto případě se již nejedná o takovou komplikaci jako v případě podbití. Krátkodobé přebíjení baterie neovlivní stav baterie tak razantně jako její podbití.

V tomto případě se tak nabízí několik řešení, jak předejít podbití baterie. Jedním z nich je sledování napětí na baterii. Díky specifikaci výrobce je známo limitní napětí vybíjení (2,75 V), pod jehož hodnotu by se napětí baterie nemělo dostat [59]. Program průběžně sleduje napětí baterie a jakmile dojde na baterii k poklesu napětí pod 2,75 V, program se automaticky zastaví. Dalším z možných řešení je použití jiné baterie s integrovanou ochranou, popř. využití některého z A/D převodníků na TinyPICO, který by při vybíjení a nabíjení monitoroval přesněji stav napětí, na základě kterého by se mohla např. rozsvítit LED indikující rizikový stav baterie.



## 5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI A DISKUZE

Funkčnost samotného zařízení byla úspěšně ověřena na několika laptotech se systémem Windows 10 a verzí Bluetooth 4.0 a vyšší (nejnovější laptop disponoval verzí Bluetooth 5.2). Zařízení bylo také úspěšně testováno na tabletu Apple iPad 6. generace se systémem iOS 14.4.2 a verzí Bluetooth 4.2.

Pro otestování funkčnosti zařízení z pohledu úspěšnosti detekce jednotlivých gest bylo vybráno několik uživatelů různého věku a pohlaví. Jednalo se o ženy a muže ve věku od 21 do 54 let (blíže specifikováno v kap. 5.1). Těmto lidem bylo zařízení obecně představeno, byli podrobně seznámeni s funkcionalitou, fotkami gest a následně bylo názorně předvedeno, jak je možné zařízení využívat. Poté si uživatelé zařízení nasadili na ruku a pokusili se jej sami zprovoznit. V této fázi nenastaly žádné komplikace a všem uživatelům se podařilo zařízení připojit k laptopu bez jakýchkoliv potíží. Dále měli uživatelé přibližně 15 minut na seznámení se se zařízením a za mojí asistence si měli možnost vyzkoušet jednotlivá gesta. Až byli uživatelé připraveni, následovalo nejdříve testování pohybu a kliku myši. Každý uživatel měl 20 pokusů, přičemž mu vždy bylo řečeno, kdy má hýbat myší a kdy provést dvojklik. Mezi jednotlivými pokusy uživatelům bylo náhodně řečeno, aby provedli jakoukoliv gestikulaci rukou. Po otestování pohybu a kliku myši bylo testováno spuštění a ukončení prezentace. Opět měli uživatelé na každé gesto 20 pokusů, přičemž nejdříve prezentaci spustili a poté ji zavřeli. Opět mezi jednotlivými gesty prováděli náhodnou gestikulaci rukou. Na závěr měli uživatelé za úkol přepínat mezi jednotlivými slidy v prezentaci, popř. si aktivovat/deaktivovat laserové ukazovátko. Na každé gesto měli již zmíněných 20 pokusů a mezi jednotlivými gesty opět prováděli náhodnou gestikulaci.

### 5.1 Výsledky testování

K posouzení úspěšnosti detekce jednotlivých gest byly využity senzitivita (S) vycházející ze vztahu (10) a specifita (P), vycházející ze vztahu (11). Zatímco senzitivita značí procentuální úspěšnost detekce daného gesta, specifita poskytuje informaci o tom, jak bylo zařízení robustní vůči náhodným pohybům ruky, když nebylo záměrem uživatele vykonávat gesto. Ve vztahu (10) označuje TP celkový počet detekovaných gest z chtěně provedených gest a FN celkový počet nedetekovaných gest z chtěně provedených gest. Ve vztahu (11) označuje TN celkový počet provedených náhodných pohybů rukou a FP celkový počet detekovaných gest z těchto náhodných pohybů. V tabulkách níže je vždy uživatel

označen kombinací písmene a číslice. Písmeno udává pohlaví uživatele (M – muž, Ž – žena) a číslice věk.

$$S = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (10)$$

$$P = \frac{TN}{TN + FP}. \quad (11)$$

U výpočtu senzitivity se vždy počet úspěšně provedených gest vydělil počtem pokusů (ve všech případech 20). Pokud tedy z 20 pokusů o provedení gesta zařízení zareagovalo na 18 pohybů uživatele, gesto bylo vyhodnoceno se senzitivitou 90 %. Senzitivita detekce gest u jednotlivých uživatelů je uvedena v Tab. 8.

Tab. 8: Senzitivita detekce gest u jednotlivých uživatelů

Gesto/ uživatel	Pohyb myši	Klik myši	Spuštění prez.	Posun vpřed	Posun vzad	Akt./deakt. ukaz.	Ukončení prez.
M24 (já)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Ž22	100 %	95 %	85 %	90 %	85 %	100 %	90 %
M25	100 %	80 %	85 %	85 %	75 %	95 %	95 %
M24	100 %	95 %	90 %	95 %	85 %	100 %	100 %
Ž26	100 %	90 %	95 %	90 %	80 %	95 %	90 %
M54	100 %	85 %	95 %	90 %	80 %	100 %	100 %
Ž51	100 %	85 %	85 %	85 %	75 %	95 %	85 %

Z dosažených výsledků (Tab. 8) je patrné, že nejmenší obtíž měli uživatelé s gestem pro pohyb myši. Zde je 100% úspěšnost logická, protože se jedná o pouhé naklonění dlaně do jedné z požadovaných stran. Velmi dobře obstála také gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka a ukončení prezentace. U těchto gest je možné vyšší úspěšnost odůvodnit tím, že se jedná o gesta statická a není tak nutné u nich vykonávat kontinuální pohyb rukou. I tak v některých případech detekce bohužel selhala z důvodu náklonu dlaně do nesprávné polohy. Z dynamických gest na tom byly nejlépe gesto pro klik myši a spuštění prezentace. U gesta pro klik myši však většina uživatelů měla poměrně velké problémy si na toto gesto zvyknout při prvotním testování zařízení a navrhovali jednotlivě jiné přístupy provedení gesta pro exekuci této instrukce (většina z nich však byla při návrhu zařízení již zvažována a uživatelům tak byla vyvrácena jejich funkčnost a reálné použití). U gesta pro spuštění prezentace pak v některých případech docházelo k tomu, že uživatelé nepozvedli ruku do požadovaného úhlu. Co se týče posledních dvou gest – detekce posunu prezentace vpřed a vzad – lépe na tom bylo gesto pro posun prezentace vpřed. Zde by (na základě zpětné vazby) většina uživatelů ocenila pro gesto pro



posun prezentace vzad využít zrcadlový přístup ke gestu pro posun prezentace vpřed. Zatímco u gesta pro posun prezentace vpřed stačí ruku rotovat pouze po dráze odpovídající čtvrtkružnici, u gesta pro posun prezentace vzad by již měla dráha ruky odpovídat půlkružnici, což mnohým uživatelům nevyhovovalo a nebyli si schopni na trajektorii tohoto pohybu zvyknout. Při testování mnou samotným nenastaly žádné komplikace a zařízení pracovalo se 100% úspěšností. Z tohoto výsledku lze konstatovat, že pohyby navržené mnou samotným nemusejí být všem uživatelům přirozené a taktéž je uživatelé nemají zautomatizované, proto u nich detekce některých gest selhávala.

Výpočet specifity byl již obtížnější. Každý uživatel totiž provedl jiný počet nežádoucích pohybů. Také bylo těžké spočítat počet pohybů v momentě, kdy někteří uživatelé prováděli delší nežádoucí gestikulaci rukou. Zatímco při výpočtu senzitivity byl jasně stanovený počet pokusů pro každého uživatele, v případě specifity již byl u každého z uživatelů výsledný počet náhodných pohybů jiný. Tyto dva faktory do jisté míry ovlivnily přesnost výsledků specifity uvedených níže v Tab. 9.

Tab. 9: Specifita detekce gest u jednotlivých uživatelů

Uživatel /Gesto	Pohyb myši	Klik myši	Spuštění prez.	Posun vpřed	Posun vzad	Akt./deakt. ukaz.	Ukončení prez.
M24 (já)	100 %	97 %	100 %	95 %	98 %	100 %	100 %
Ž22	100 %	92 %	100 %	98 %	89 %	100 %	100 %
M25	100 %	90 %	100 %	100 %	92 %	100 %	100 %
M24	100 %	87 %	98 %	95 %	88 %	100 %	100 %
Ž26	100 %	91 %	100 %	94 %	94 %	100 %	100 %
M54	100 %	88 %	96 %	96 %	94 %	100 %	100 %
Ž51	100 %	90 %	100 %	93 %	89 %	100 %	100 %

Co se týče výsledků specifity, nejlépe dopadla gesta pro aktivaci/deaktivaci laserového tlačítka a ukončení prezentace. V tomto případě jsou výsledky očekávané, protože u jakékoliv nežádoucí gestikulace je ruka v pohybu, a tato dvě gesta jsou detekována pouze u nehybné ruky ve stálé poloze. Velmi dobře dopadlo také gesto pro spuštění prezentace, u kterého se dobré výsledky také daly očekávat. Pohyb je totiž velmi specifický z pohledu vychýlení a natočení dlaně do stran při pozdvižení předloktí, což není pro člověka při nezávislé gestikulaci příliš pohodlné. Poměrně dobře dopadlo i gesto pro posun prezentace vpřed, u kterého byly vzhledem ke specifitě jeho pohybu stejně jako v případě senzitivity očekávány lepší výsledky než u gesta pro posun prezentace vzad. Při gestikulaci rukou je totiž pro člověka fyziologické rozmachovat rukou do strany, což do jisté míry připomíná právě gesto pro posun prezentace vzad. Poměrně špatně dopadlo gesto pro klik myši. To je v tomto případě způsobené tím, že je toto gesto závislé na

akcelerometrických datech. Při jakékoliv gestikulaci jsou to právě akcelerometrická data, která dosahují nenulových hodnot. I když je rukou mávnuto pouze do jedné strany (a jsou tedy zvýšeny hodnoty akcelerometrických dat pouze v jedné ose pohybu), pohyb byl v některých případech tak rychlý, že i data z jedné osy pohybu překročila práh detekce pro klik myši a toto gesto tak bylo zaměněno za nezávislou gestikulaci rukou.

Celkové výsledky senzitivity a specifity pro všechna gesta jsou shrnuty v Tab. 10. Tyto hodnoty byly vypočítány jako průměr hodnot pro jednotlivá gesta z Tab. 8 a Tab. 9.

Tab. 10: Celková senzitivita a specifita detekce gest

Gesto/ S, P	Pohyb myši	Klik myši	Spuštění prez.	Posun vpřed	Posun vzad	Akt./deakt. ukaz.	Ukončení prez.
Senzitivita	100 %	90 %	91 %	91 %	83 %	98 %	94 %
Specifita	100 %	91 %	99 %	96 %	92 %	100 %	100 %

Celkové výsledky (Tab. 10) potvrdily skutečnost, že nejlépe obstálo gesto pro pohyb myši a také statická gesta. Ze dvou statických gest obstálo lépe gesto pro aktivaci a deaktivaci laserového ukazovátka. Ukázalo se, že pouhé předpažení rukou je pro uživatele pohodlnější a přirozenější než vytočení dlaně dozadu. Bezkonkurenčně však tato dvě gesta obstála z pohledu specifity. Zde je 100% úspěšnost na místě, protože pro člověka při prezentování není přirozené držet ruku v pozicích, které odpovídají navrženým gestům. Velmi podobně si vedla z pohledu senzitivity gesta pro klik myši, spuštění prezentace a posun prezentace vpřed. Hůře pak dopadlo gesto pro posun prezentace vzad – zde se potvrdila již zmíněná skutečnost, kdy si uživatelé při testování stěžovali na ne příliš sofistikovaně navržený pohyb pro toto gesto. Z pohledu specifity nejhůře obstálo gesto pro klik myši. Zde může být tato snížená hodnota odůvodněná tím, že se jedná o detekci gesta z akcelerometrických dat a v momentě, kdy uživatel provádí rychlé náhodné pohyby rukou, senzor zaznamená akceleraci a je vykonáno právě gesto pro klik myši. Tato hodnota je však stále nad 90% hranicí, a to z důvodu vypnutého kurzoru při prezentování (v případě, že by se kurzor po spuštění prezentace nedeaktivoval, hodnota by byla jistě o poznání nižší). Téměř stoprocentně obstálo z pohledu specifity gesto pro spuštění prezentace. Zde je opět tak vysokou hodnotu možné odůvodnit tím, že po provedení gesta a následném spuštění prezentace již toto gesto (až do opětovného ukončení prezentace) nemůže být vyvoláno. Pravidlo, které platilo u senzitivity gesta pro posun prezentace vzad se také potvrdilo u jeho specifity, kde program toto gesto bohužel několikrát zaměnil za náhodné pohyby rukou při prezentování. Hodnotu nad hranicí 90 % do jisté míry zachránil fakt, že toto gesto nemůže být vyvoláno bez spuštěné prezentace – proto když uživatelé prováděli náhodné pohyby rukou při aktivním kurzoru, toto gesto nemohlo být exekvováno.

Z výsledků je patrné, že nejhůře obstála gesta pro klik myši a posun prezentace vzad, u kterých by do budoucna mohla být detekční logika zlepšena, popř. od základů jinak navržena. Ostatní gesta obstála jak z pohledu senzitivity, tak z pohledu specifity velmi dobře, přičemž jejich hodnoty se vyšplhaly nad hranici 90 %. Nutno znovu zdůraznit, že před testováním byly uživatelům osobně naznačeny všechny pohyby rukou pro výkon daných gest a následně si uživatelé mohli daná gesta před samotným testováním vyzkoušet a nacvičit.

Vzhledem k tomu, že nebyly nalezeny žádné publikace popisující stejné nebo podobné zařízení, díky kterému by bylo možné ovládat počítačovou prezentaci pomocí gest, která by byla detekována pomocí příznaků z gyroskopických a akcelerometrických dat, není relevantní výsledky testování tohoto zařízení srovnávat s jinými zařízeními rozebranými v rešerši této práce.

## 5.2 Návrhy pro zlepšení zařízení

Žádné zařízení na světě není dokonalé, a proto i na tomto zařízení je celá řada věcí, které by se daly odladit, popř. vylepšit. Některá vylepšení by jistě řadu uživatelů potěšila více, některá naopak méně. V této kapitole budou shrnuty návrhy možného vylepšení zařízení, a to jak softwarového, tak hardwarového.

Hlavní kámen úrazu v dnešním světě je jistě velikost a váha každého zařízení. Všichni výrobci chytrých zařízení se svoje výrobky snaží co nejvíce minimalizovat, aby byly při používání pohodlné a lehké. Hlavním vylepšením by tedy bylo zařízení minimalizovat. Jedním z návrhů je již (v kap. 4.3) zmíněný návrh, který popisuje umístění zařízení na rukavici. V tomto případě by byl vynechán návrh desky plošných spojů a jednotlivé piny komponent by se pouze spájely drátky. Takové řešení by mělo jistě velký dopad na výšku celého zařízení. IMU senzor by pak mohl být umístěn nad mikrokontrolér, což by pak degradovalo i šířku zařízení, která by pak byla omezena pouze použitou baterií. Výhodnějším řešením by však v tomto případě bylo využití mikrokontroléru s již zabudovaným gyroskopem, akcelerometrem a vlastním spínačem, popř. i s integrovanou minibaterií.

Co se hardwarového vylepšení týče, u zařízení by bylo pro komfort užívání vhodné monitorovat jeho stav – např. aktuální chod nebo procentuální stav baterie. Aktuální chod mikrokontroléru by se dal jednoduše vyřešit přidáním LED, která by při stálém svícení indikovala zapnuté zařízení. Pro tuto diodu by bylo možné do krytu krabičky umístit otvor, tak jako na hmatník spínače (Obr. 58). Procentuální stav baterie nebo její napětí by se pak mohly zobrazovat na displeji, který by byl zabudován do krytu krabičky. V případě využití takového displeje by se také mohly zobrazovat instrukce pro používání, provedená gesta nebo také úspěšně načtené periferie (v tomto případě IMU senzor) a jejich stav. Další hardwarovou

vychytávkou by mohlo být přidání dalších tlačítek (bez aretace), díky kterým by se dala přepínat např. citlivost myši (ta byla v této práci fixně nastavena, avšak může být jednoduše změněna v programu zařízení). Pomocí dalšího tlačítka by si pak uživatel mohl volit, na které ruce má zařízení umístěno a jednotlivá gesta by tomu byla softwarově přizpůsobená. Tlačítko by pak mohlo sloužit i k přepínání módů na zařízení. V jednom módu by se zařízením dala ovládat prezentace, v dalším pak např. zesilovat a zeslabovat hudba ve videu, nebo video pozastavit. Jednotlivé funkce daných módů by pak mohly využívat rozdílná nebo i stejná gesta. Všechny tyto údaje, ať už o stavu baterie, nastavené citlivosti myši, použité ruce nebo nastaveném módu by se pak mohly zobrazovat na již zmíněném displeji integrovaném v krytu krabičky.

Hlavním softwarovým vylepšením by bylo využití neuronových sítí pro klasifikaci jednotlivých gest. To by však s sebou neslo vyšší náročnost na výpočetní výkon mikrokontroléru, což by mělo za následek i vyšší cenu zařízení.

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce zaměřené na bezkontaktní ovládání počítačové prezentace pomocí gest bylo provést teoretickou rešerši v oblasti bezkontaktního ovládání počítače. Tato rešerše byla v práci zaměřena na využití ultrazvukové sensoriky, kamerového snímání, bezdrátových rukavic a IR senzorů. Pro každé z těchto odvětví bylo uvedeno několik příkladů využití v praxi a uvedeny výsledky testování.

Dalším cílem práce bylo nalézt vhodnou hardwarovou sensoriku využívanou v této práci a teoreticky ji popsat. V této části bylo nejdříve uvedeno obecné dělení senzorů, přičemž byly jednotlivé typy sensoriky teoreticky rozebrány. U vývojové desky TinyPICO ESP32, která je pro tuto práci stěžejní byl uveden rozbor pinů a sběrnic, které deska obsahuje, popis hardwaru a dále byla srovnána se svými předchůdci ESP32 a ESP8266. Dalším prvkem této práce je IMU senzor BNO055, jehož rozbor byl zaměřen především na obecné vlastnosti senzoru a stupně volnosti. V neposlední řadě byl senzor srovnán se čtveřicí dalších dostupných senzorů na trhu a také byly v práci po boku těchto dvou komponent zmíněny další komponenty, které jsou v práci využity – lithium-polymerová baterie LP503040 a dvoupolohový spínač s aretací B1702A.

Klíčovou částí této práce je samotný návrh zařízení a gest. V této části byla navržena řídicí elektronika, kterou zastupuje vývojová deska TinyPICO ESP32 napájená lithium-polymerovou baterií a senzor BNO055, který desce předává data. Propojení těchto dvou komponent, stejně jako návrh celého zařízení, které je umístěno na ruku byl jak teoreticky popsán, tak schematicky naznačen. Taktéž je v této části uveden názorný příklad dat, které senzor BNO055 poskytuje. V další kapitole byly již uvedeny fotografie naznačující samotný průběh navržených gest. Dále zde byly uvedeny grafy zobrazující průběh polohových a akcelerometrických dat senzoru pro jednotlivá gesta, na základě kterých byly navrženy algoritmy pro detekci jednotlivých gest. Je zde uvedeno jak blokové schéma celého programu, tak postup detekce pro jednotlivá gesta vyobrazen blokovými schématy. Finální verze zařízení disponuje funkcionalitou sedmi gest – pohyb myši, klik myši, spuštění prezentace, posun prezentace vpřed a vzad, aktivace/deaktivace laserového ukazovátka a ukončení prezentace.

Dalším cílem byl návrh obalu a propojení jednotlivých komponent. Propojení bylo realizováno na desce tištěných spojů, obal pak krabičkou s krytem vytištěným na 3D tiskárně z PLA materiálu. Na krabičku je uchycen pásek, pomocí kterého celé zařízení drží pohodlně na ruce.

Zařízení bylo testováno na několika jedincích – mužích i ženách různého věku. Posuzována byla senzitivita a specifita detekce jednotlivých gest. Nejlépe

z testování vyšla gesta statická – gesto pro aktivaci/deaktivaci laserového ukazovátka a gesto pro ukončení prezentace – a také gesto pro pohyb myši. Tato tři gesta dosahovala téměř 100% úspěšnosti v oblasti senzitivity (gesto pro pohyb myši přesně 100 %) a 100% úspěšnosti v oblasti specifity. O něco hůře na tom byla gesta pro spuštění prezentace a posun prezentace vpřed, jejichž úspěšnost se pohybovala lehce nad hranicí 90 %. Nejhorší pak dopadla gesta pro klik myši a posun prezentace vzad. U gesta pro posun prezentace vzad byla úspěšnost pod hranicí 90 % (specifita pak spadla až k téměř 80 %) a je na místě zvážení jiné detekční logiky.

Na závěr byla navržena možná zlepšení zařízení, a to jak po softwarové, tak hardwarové stránce.

Zařízení navržené v této práci lze považovat za úspěšně funkční a ověřené v praxi na několika laptotech a tabletu s různými operačními systémy. Po přeprogramování jednotlivých instrukcí by jistě našlo uplatnění nejen pro ovládání prezentace, ale i v jiných aplikacích v biomedicínském odvětví.

Práce byla také úspěšně představena na 27. ročníku studentské konference EEICT. Článek k práci psaný v anglickém jazyce bude zařazen do sborníku prací pro rok 2021 [60].

# LITERATURA

- [1] COHEN, C.J., G. BEACH a G. FOULK. A basic hand gesture control system for PC applications. In: *Proceedings 30th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR 2001). Analysis and Understanding of Time Varying Imagery* [online]. IEEE Comput. Soc, 2001, s. 74-79 [cit. 2020-10-05]. ISBN 0-7695-1245-3. Dostupné z: doi:10.1109/AIPR.2001.991206
- [2] MA40A5R Datasheet [online]. [cit. 2020-10-06]. 1-7. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/>
- [3] AYAD AHMED EBRAHIM, RUZAIRI ABDUL RAHIM, Anita Ahmad a Khairul Hamimah ABAS. UltraSonic Sensor for Distance Measurement. 2013, (May).
- [4] ASWINTH, Raj. *Control your Computer with Hand Gestures using Arduino* [online]. 2017. [cit. 2020-10-07] Dostupné z: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/control-your-computer-with-hand-gestures>
- [5] GRIF, Horatiu-Stefan a Cornel Cristian FARCAS. Mouse Cursor Control System Based on Hand Gesture. *Procedia Technology* [online]. 2016, **22**, 657-661 [cit. 2020-10-06]. ISSN 22120173. Dostupné z: doi:10.1016/j.protcy.2016.01.137
- [6] ERTUGRUL, Egemen, Ping LI a Bin SHENG. On attaining user-friendly hand gesture interfaces to control existing GUIs. *Virtual Reality & Intelligent Hardware* [online]. 2020, 2(2), 153-161 [cit. 2020-10-10]. ISSN 20965796. Dostupné z: doi:10.1016/j.vrih.2020.02.001
- [7] Intel RealSense SDK for Windows [online]. 2017. [cit. 2020-10-10] Dostupné z: <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/articles/realsense-sdk-windows-eol.html>
- [8] SMI. iView X System Manual. [online]. 2014. [cit. 2020-10-10] Dostupné z: [https://psychologie.unibas.ch/fileadmin/user\\_upload/psychologie/Forschung/N-Lab/SMI\\_iView\\_X\\_Manual.pdf](https://psychologie.unibas.ch/fileadmin/user_upload/psychologie/Forschung/N-Lab/SMI_iView_X_Manual.pdf)
- [9] NÉTEK, Rostislav. Possibilities of contactless control of web map applications by sight. *Geoinformatics FCE CTU* [online]. 2011, **7**, 55-72 [cit. 2020-10-12]. ISSN 1802-2669. Dostupné z: doi:10.14311/gi.7.5
- [10] WHITMIRE, Eric, Mohit JAIN, Divye JAIN, Greg NELSON, Ravi KARKAR, Shwetak PATEL a Mayank GOEL. DigiTouch. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies* [online]. 2017, **1**(3), 1-21 [cit. 2020-10-12]. ISSN 2474-9567. Dostupné z: doi:10.1145/3130978
- [11] LEE, Seongil, Sang Hyuk HONG a Jae Wook JEON. Designing a universal keyboard using chording gloves. In: *Proceedings of the 2003 conference on Universal usability - CUU '03* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2003, 2003, s. 142-147 [cit. 2020-10-13]. ISBN 158113701X. Dostupné z: doi:10.1145/957205.957230

- [12] MACKENZIE, I. Scott a R. William SOUKOREFF. Phrase sets for evaluating text entry techniques. In: *CHI '03 extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI '03* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2003, 2003, s. 754-755 [cit. 2020-10-13]. ISBN 1581136374. Dostupné z: doi:10.1145/765891.765971
- [13] INVENSENSE. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.3 [online]. 2012. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: [www.invensense.com](http://www.invensense.com)
- [14] ARDUINO. *Arduino Nano* [online]. 2020. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [15] YUDHANA, A., J. RAHMAWAN a C. U.P. NEGARA. Flex sensors and MPU6050 sensors responses on smart glove for sign language translation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **403**(1). [cit. 2020-11-01]. ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/403/1/012032
- [16] *Gallaudet Research Institute* [online]. Washington: Gallaudet University. 2010. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.gallaudet.edu/>
- [17] *Sluchová postižení a jejich statistika* [online]. B.m.: Masarykova Univerzita v Brně. 2010. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: [https://www.teiresias.muni.cz/comin/kurz-komunikace-se-sluchove-postizenymi/sluchova-postizeni-a-jejich-statistika#txt\\_1](https://www.teiresias.muni.cz/comin/kurz-komunikace-se-sluchove-postizenymi/sluchova-postizeni-a-jejich-statistika#txt_1)
- [18] NOVÁK, Martin. *Statistiky počtu osob se sluchovým postižením* [online]. 2017. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.cun.cz/cs/blog/2017/05/17/statistiky-poctu-osob-se-sluchovym-postizenim/>
- [19] ŠEDIVÝ, Miroslav. *Ovládání PC pomocí webové kamery*. 2009. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra softwaru a výuky informatiky. Vedoucí práce Pelikán, Josef.
- [20] WEBER, P., E. RUECKERT, R. CALANDRA, J. PETERS a P. BECKERLE. A low-cost sensor glove with vibrotactile feedback and multiple finger joint and hand motion sensing for human-robot interaction. *25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016* [online]. 2016. s. 99–104. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: doi:10.1109/ROMAN.2016.7745096
- [21] LEE, A. reum, Yongwon CHO, Seongho JIN a Namkug KIM. Enhancement of surgical hand gesture recognition using a capsule network for a contactless interface in the operating room. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* [online]. 2020, **190**, [cit. 2020-10-29]. ISSN 18727565. Dostupné z: doi:10.1016/j.cmpb.2020.105385
- [22] ULTRALEAP. *How Does the Leap Motion Controller Work?* [online]. 2019. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://blog.leapmotion.com/hardware-to-software-how-does-the-leap-motion-controller-work/>



- [23] PARK, Ben Joonyeon, Taekjin JANG, Jong Woo CHOI a Namkug KIM. Gesture-Controlled Interface for Contactless Control of Various Computer Programs with a Hooking-Based Keyboard and Mouse-Mapping Technique in the Operating Room. *Computational and Mathematical Methods in Medicine* [online]. 2016, **2016**, 1-7 [cit. 2020-10-29]. ISSN 17486718. Dostupné z: doi:10.1155/2016/5170379
- [24] RASHID, Adnan a Osman HASAN. Wearable technologies for hand joints monitoring for rehabilitation: A survey. *Microelectronics Journal* [online]. 2019, **88**, 173–183 [cit. 2020-10-31]. ISSN 00262692. Dostupné z: doi:10.1016/j.mejo.2018.01.014
- [25] BOBALÍK, L. Využití senzorů MEMS pro lokální určení polohy-diplomová práce. Brno, 2014. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaromír Žák. FEKT VUT v Brně
- [26] BUI, The Duy a Long Thang NGUYEN. Recognizing postures in vietnamese sign language with MEMS accelerometers. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2007, **7**(5), 707–712 [cit. 2020-11-01]. ISSN 1530437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2007.894132
- [27] HUSÁK, Miroslav. Užití MEMS v průmyslu. *AUTOMA* [online]. 2008, (12), 14–18. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>
- [28] FERNANDEZ, Alfonso. *Piezoelectric transducers* [online]. 2020. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://power-mi.com/content/piezoelectric-transducers>
- [29] VOJÁČEK, Antonín. *Integrované MEMS GYROSKOPY* [online]. 2009. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integroovane-mems-gyroskopy>
- [30] SHEN, Zhong, Juan YI, Xiaodong LI, Mark Hin Pei LO, Michael Z. Q. CHEN, Yong HU a Zheng WANG. A soft stretchable bending sensor and data glove applications. *Robotics and Biomimetics* [online]. 2016, **3**(1), 1–8 [cit. 2020-11-18]. ISSN 2197-3768. Dostupné z: doi:10.1186/s40638-016-0051-1
- [31] CONNELLY, Lauri, YICHENG JIA, Maria L TORO, Mary Ellen STOYKOV, Robert V KENYON a Derek G KAMPER. A Pneumatic Glove and Immersive Virtual Reality Environment for Hand Rehabilitative Training After Stroke. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* [online]. 2010, **18**(5), 551-559 [cit. 2020-12-28]. ISSN 1534-4320. Dostupné z: doi:10.1109/TNSRE.2010.2047588
- [32] KAPUSCINSKI, T. a M. WYSOCKI. Hand gesture recognition for man-machine interaction. In: *Proceedings of the Second International Workshop on Robot Motion and Control. RoMoCo'01 (IEEE Cat. No.01EX535)* [online]. Poznan Univ. Technol, 2001, s. 91-96 [cit. 2020-12-28]. ISBN 83-7143-515-0. Dostupné z: doi:10.1109/ROMOCO.2001.973437

- [33] YU, Chenglong, Xuan WANG, Hejiao HUANG, Jianping SHEN a Kun WU. Vision-Based Hand Gesture Recognition Using Combinational Features. In: *2010 Sixth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing* [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 543-546 [cit. 2020-12-28]. ISBN 978-1-4244-8378-5. Dostupné z: doi:10.1109/IIHMSP.2010.138
- [34] MALIMA, A., E. OZGUR a M. CETIN. A Fast Algorithm for Vision-Based Hand Gesture Recognition for Robot Control. In: *2006 IEEE 14th Signal Processing and Communications Applications* [online]. IEEE, 2006, s. 1-4 [cit. 2020-12-28]. ISBN 1-4244-0238-7. Dostupné z: doi:10.1109/SIU.2006.1659822
- [35] M., Manigandan a I. Manju JACKIN. Wireless Vision Based Mobile Robot Control Using Hand Gesture Recognition Through Perceptual Color Space. In: *2010 International Conference on Advances in Computer Engineering* [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 95-99 [cit. 2020-12-28]. ISBN 978-1-4244-7154-6. Dostupné z: doi:10.1109/ACE.2010.69
- [36] FANG, Yikai, Kongqiao WANG, Jian CHENG a Hanqing LU. A Real-Time Hand Gesture Recognition Method. In: *Multimedia and Expo, 2007 IEEE International Conference on* [online]. IEEE, 2007, 2007, s. 995-998 [cit. 2020-12-29]. ISBN 1-4244-1016-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICME.2007.4284820
- [37] ESPRESSIF. ESP32 Series Datasheet. *Espressif Systems* [online]. 2019, 1-61. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: [www.espressif.com](http://www.espressif.com)
- [38] DRAGÚŇ, Peter. *Chytré zabezpečovací zařízení* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/191560>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií. Ústav počítačových systémů. Vedoucí práce Zdeněk Vašíček.
- [39] ESP8266 DATASHEET. ESP8266EX Datasheet. *Espressif Systems Datasheet* [online]. 2015. 1-31. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: [https://www.adafruit.com/images/product-files/2471/0A-ESP8266\\_Datasheet\\_EN\\_v4.3.pdf](https://www.adafruit.com/images/product-files/2471/0A-ESP8266_Datasheet_EN_v4.3.pdf)
- [40] MALÝ, Luboš. Vývojová deska ESP32 [online]. 2017. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/vyvojova-deska-esp32.html>
- [41] SYSTEMS, Espressif. *Datasheet ESP32-PICO-D4* [online]. 2021. [cit. 2021-05-03] Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-pico-d4\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-pico-d4_datasheet_en.pdf)
- [42] P. GEORGE, Damien. *Micropython* [online]. 2018. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://micropython.org/>
- [43] P. GEORGE, Damien a Paul SOKOLOVSKY. *Micropython - Quick reference for the ESP32* [online]. 2020. [cit. 2020-12-03] Dostupné z: <http://docs.micropython.org/en/latest/esp32/quickref.html>
- [44] *Arduino* [online]. 2020. [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/software>

- [45] ROZENBLUM, Seon. *TinyPICO* [online]. 2021. [cit. 2021-05-03] Dostupné z: <https://www.tinypico.com/>
- [46] GROMEŠ, J. Přípravek pro emulaci senzorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 68 s., 10 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek, Ph.D.
- [47] FRANEK, M. Vývojový kit pro komunikaci mikrokontrolérů s počítačem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Levek.
- [48] SEMICONDUCTORS NPX, N. *UM10204, I2C-bus specification and user manual* [online]. 2014. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [49] TOWNSEND, Kevin. Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor [online]. 52 s. 2020. [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor.pdf?timestamp=1609089665>
- [50] WAHYUDI, Meita Sukma LISTIYANA, SUDJADI a NGATELAN. Tracking Object based on GPS and IMU Sensor. In: *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 214-218 [cit. 2020-12-28]. ISBN 978-1-5386-5529-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICITACEE.2018.8576928
- [51] BOSCH SENSORTEC. *Datasheet BNO055* [online]. 2014. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST\\_BNO055\\_DS000\\_12.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12.pdf)
- [52] ZVONEK, Richard. *Mechanismy řízení robotického auta NXP (FREESCALE)* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/136273>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [53] INVENSENSE. *Datasheet MPU6050* [online]. 2013. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [54] MOUSER ELECTRONICS, Inc. *Mouser Electronics* [online]. 2020. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/>
- [55] INVENSENSE. *Datasheet MPU9250* [online]. 2016. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- [56] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *Datasheet MM7150* [online]. 2016. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001888B.pdf>

- [57] ST-MICROELECTRONICS. *Datasheet LSM9DS1* [online]. 2015. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/038/883/original/LSM9DS1.pdf?1485999363>
- [58] Blackketter. *ESP32-BLE-Combo library* [online]. 2020. [cit. 2020-12-26]. Dostupné z: <https://github.com/blackketter/ESP32-BLE-Combo>
- [59] AKYGA. *Specification Approval Sheet* [online]. 2013, 9. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.elektronik.ropla.eu/en/magazyn/magazyn/?ic=AKY0077>
- [60] NĚMEC, Radek. A SYSTEM FOR CONTROLLING COMPUTER PRESENTATION USING GESTURES. In *Proceedings of the 27th Conference STUDENT EEICT 2021*. 2021. 4 s. ISBN: 978-80-214-5942-7